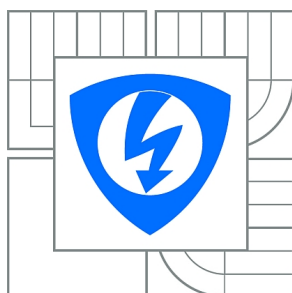




**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ**

**ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

# **NÁVRH KMITOČTOVÝCH FILTRŮ METODOU AUTONOMNÍHO OBVODU S VÍCEBRANOVÝMI ZDROJI PROUDU ŘÍZENÝMI PROUDEM**

DESIGN OF FREQUENCY FILTERS BY THE METHOD OF AUTONOMOUS CIRCUIT WITH  
MULTI-PORT CURRENT-CONTROLLED CURRENT SOURCES

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**MARTIN JANEČEK**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. DAVID KUBÁNEK, Ph.D.**

BRNO 2011



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav telekomunikací

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor  
**Teleinformatika**

**Student:** Martin Janeček

**ID:** 109664

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2010/2011

## NÁZEV TÉMATU:

**Návrh kmitočtových filtrů metodou autonomního obvodu s vícebranovými zdroji proudu řízenými proudem**

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s návrhem analogových aktivních kmitočtových filtrů druhého řádu pomocí metody autonomního obvodu. Aplikujte tento postup při návrhu vlastního filtračního obvodu. Jako aktivní prvky využívejte vícebranové zdroje proudu řízené proudem. Proveďte počítačovou simulaci navrženého obvodu a zhodnoťte jeho vlastnosti. Vybraný obvod prakticky realizujte a proveďte měření jeho vlastností.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Jeřábek, J., Koton, J., Vrba, K. Zobecněná metoda návrhu multifunkčních kmitočtových filtrů. Elektrotechnika, 41/2007
- [2] Jeřábek, J., Vrba, K. Dolní propust třetího řádu v čistě proudovém módu. Elektrotechnika, 36/2007
- [3] Jeřábek, J., Lattenberg, I. Návrh kmitočtových filtrů s CMI vycházející z obecné admitanční sítě. Elektrotechnika, 50/2002

**Termín zadání:** 7.2.2011

**Termín odevzdání:** 2.6.2011

**Vedoucí práce:** Ing. David Kubánek, Ph.D.

**prof. Ing. Kamil Vrba, CSc.**  
*Předseda oborové rady*

## UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## ABSTRAKT

Cílem práce je prostudovat principy říditelných kmitočtových filtrů v proudovém módu. V práci jsou shrnuty obecné vlastnosti proudových prvků. Práce se zaměřuje především na prvek GCMI a jeho použití v kmitočtovém multifunkčním filtru v proudovém módu. Filtr je navržen autonomní metodou. Filtr je zde simulován s aktivními prvky OPA860 a AD844. Nakonec je v této práci multifunkční filtr praktický realizován v provedení s aktivním prvkem OPA860.

## KLÍČOVÁ SLOVA

GCMI, CC, kmitočtový filtr, autonomní metoda, proudový mód, OPA860

## ABSTRACT

The aim is to study the principles of controllable frequency current-mode filters. The paper summarizes the general characteristics of current elements. The work focuses on the element GCMI and its use in multi frequency current-mode filters. The filter is designed autonomous method. The filter is simulated with active elements of the OPA860 and AD844. Finally, in this work is multi-filter is implemented in a practical implementation of the active element OPA860.

## KEYWORDS

GCMI, CC, frequency filter, an autonomous method, current mode, OPA860

#### BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

JANEČEK, M. *Návrh kmitočtových filtrů metodou autonomního obvodu s vícebranovými zdroji proudu řízenými proudem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 48 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. David Kubánek, Ph.D.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci na téma „Návrh kmitočtových filtrů metodou autonomního obvodu s vícebranovými zdroji proudu řízenými proudem“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího semestrální práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.“

V Brně dne 6. června 2011

.....

(podpis autora)

## POĎĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. David Kubánek, Ph.D.. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne 6. června 2011

.....

(podpis autora)

# Obsah

1	Úvod.....	11
2	Základní teorie filtrů .....	12
3	Typy kmitočtových filtrů podle použitých stavebních prvků .....	12
3.1	Typy kmitočtových filtrů podle přenášeného pásma.....	13
3.2	Přenos a přenosová funkce kmitočtových filtrů .....	15
3.3	Rozdělení filtrů podle druhů pracovních módů.....	17
3.3.1	Napěťový mód .....	17
3.3.2	Proudový mód.....	18
3.3.3	Smíšený mód.....	19
4	Aktivní bloky používané ve filtrech v proudovém módu .....	20
4.1	Proudové konvejory.....	20
4.2	Popis GCMÍ.....	21
5	Multifunkční kmitočtový filtr v proudovém módu .....	22
5.1	Návrh filtru autonomní metodou .....	22
5.2	Nahrazení prvku GCMÍ zdrojem proudu řízeným proudem .....	27
5.3	Nahrazení prvku GCMÍ aktivními prvky s parazitními vlastnostmi .....	30
5.3.1	Srovnání charakteristik s různými parazitními vlastnostmi – Dolní propust .....	30
5.3.2	Srovnání charakteristik s různými parazitními vlastnostmi – Pásmová propust .....	32
5.3.3	Srovnání charakteristik s různými parazitními vlastnostmi – Horní propust .....	33
5.4	Model multifunkčního filtru ze součástek OPA860 a AD844 .....	35
6	Realizace multifunkčního filtru .....	38
6.1	Funkce zapojení .....	38



6.2	Konstrukce .....	38
6.3	Experimentální měření .....	39
7	Závěr .....	40
	Literatura .....	41
	Seznam použitých symbolů a zkratk .....	42
	Seznam příloh .....	43

## Seznam obrázků

OBR.: 3.1	DOLNÍ PROPUST .....	14
OBR.: 3.2	HORNÍ PROPUST .....	14
OBR.: 3.3	PÁSMOVÁ PROPUST .....	15
OBR.: 3.4	PÁSMOVÁ ZÁDRŽ .....	15
OBR.: 3.5	FILTR JAKO DVOJBRAN .....	16
OBR.: 3.6	NAPĚŤOVÝ MÓD.....	18
OBR.: 3.7	PROUDOVÝ MÓ.....	18
OBR.: 4.1	KONVEJOR CC .....	20
OBR.: 4.2	KONVEJOR DVCC .....	20
OBR.: 4.3	GCM I .....	21
OBR.: 5.1	SCHÉMA GCM I PRVKY Y .....	23
OBR.: 5.2	SCHÉMA GCM I PRVKY G C .....	24
OBR.: 5.3	SCHÉMA GCM I PRVKY R C.....	27
OBR.: 5.4	MODEL ZAPOJENÍ DP (F) .....	28
OBR.: 5.5	MODEL ZAPOJENÍ PP (F) .....	28
OBR.: 5.6	MODEL ZAPOJENÍ HP (F) .....	29
OBR.: 5.7	IDEÁLNÍ CHARAKTERISTIKY MULTIFUNKČNÍHO FILTRU ZA POUŽITÍ SOUČÁSTEK GCM I .....	29
OBR.: 5.8	MODEL ZAPOJENÍ DP (H,G) .....	30
OBR.: 5.9	DOLNÍ PROPUST - SROVNÁNÍ CHARAKTERISTYK DLE PARAZITNÍCH PRVKŮ .....	31
OBR.: 5.10	MODEL ZAPOJENÍ PP (H,G).....	32
OBR.: 5.11	PÁSMOVÁ PROPUST - SROVNÁNÍ CHARAKTERISTYK DLE PARAZITNÍCH PRVKŮ .....	32
OBR.: 5.12	MODEL ZAPOJENÍ HP .....	33
OBR.: 5.13	HORNÍ PROPUST - SROVNÁNÍ CHARAKTERISTYK DLE PARAZITNÍCH PRVKŮ .....	34
OBR.: 5.14	DOLNÍ PROPUST - SROVNÁNÍ CHARAKTERISTYK DLE POUŽITÝCH OBVODŮ.....	36
OBR.: 5.15	PÁSMOVÁ PROPUST - SROVNÁNÍ CHARAKTERISTYK DLE POUŽITÝCH OBVODŮ .....	36
OBR.: 5.16	HORNÍ PROPUST - SROVNÁNÍ CHARAKTERISTYK DLE POUŽITÝCH OBVODŮ.....	37
OBR.: 6.1	EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ ZREALIZOVANÉHO MULTIFUNKČNÍHO FILTRU (AKT.PRVEK OPA860) .....	39

# 1 Úvod

V dnešní době se s kmitočtovými filtry pracuje v různých odvětvích elektrotechniky za účelem zpracování signálů. Dříve se filtry sestavovaly především z pasivních prvků, ale v dnešní době se často využívají filtry, které obsahují aktivní prvky. Díky tomu se výrobci snaží o vývoj aktivních prvků s lepšími vlastnostmi, jako jsou odstup signálu od šumu, šířka pásma, napájecí napětí a další. Vývoj s sebou přináší nové aktivní prvky, např. konvejory, které se samostatně moc nevyrábí, ale můžeme je poskládat z jiných obvodů s přibližně stejnými vlastnostmi.

Kmitočtové filtry se zařazují do mnohých zařízení k úpravě, zesílení či potlačení signálu nebo potlačení rušivých složek signálu.

V tomto semestrálním projektu se budu zabývat návrhem kmitočtového filtru v proudovém módu. Použiji metodu autonomního obvodu s vícebranovými zdroji proudu řízeným proudem.

## 2 Základní teorie filtrů

Kmitočtové filtry mají za úkol propustit oblast signálu v určitém rozsahu kmitočtů bez nebo v námi zvoleném mezním útlumu. Tento rozsah se nazývá propustné pásmo. Pásmo kmitočtů, které filtr nepropouští, se nazývá nepropustné pásmo nebo jeho útlum. Tyto vlastnosti filtru lze obvykle vyjádřit závislostí modulu napětového přenosu na kmitočtu pomocí tzv. modulové charakteristiky. Další používanou charakteristikou při měření filtrů časového zpoždění signálu je fázová kmitočtová charakteristika. Ta se především využívá u fázovacích filtrů, které převrací nebo upravují fázi procházejícího signálu. Kmitočtové filtry jsou lineární dvojbrany.

V praxi se filtry využívají všude, kde je zapotřebí zpracovávat signály. Kmitočtové filtry patří mezi základní stavební bloky pro zpracování signálů. Např. z radiových vln, které se nám dostávají do rádia (televize), je třeba oddělit pásmo jedné stanice pomocí pásmové propusti. V elektroakustice se využívá dolních propustí k záznamům pouze užitečných - tedy námi slyšitelných vln. V měřící technice se používají selektivní přístroje (mikro-voltmetry). V antialiasingovém filtru funguje na principu dolní propusti, bez kterého by nebylo možné vzorkovat.

## 3 Typy kmitočtových filtrů podle použitých stavebních prvků

Kmitočtové filtry můžeme rozdělit na pasivní filtry, aktivní filtry, číslicové filtry. Tedy podle způsobu jejich realizace. Ta má vliv na vlastnosti daného filtru, kterými jsou odolnost proti rušení, co produkuje samotný filtr, odolnost proti vnějšímu rušení a možné pracovní pásmo. Filtry můžeme dělit podle stavebních prvků, které byly použity.

### Pasivní filtry RC

Jsou sestaveny pouze z rezistorů a kondenzátorů. V praxi se používají pouze filtry 1. řádu a jejich kvalita není příliš velká. Použití asi od 0,1 Hz až do 10 MHz.

### Pasivní filtry RLC

Jsou sice velmi univerzální, ale díky nevhodným vlastnostem cívky (velikost) při použití hlavně na nízkých frekvencích. Dalším nevhodným aspektem je i cena, což je v dnešní

době jedním z nejdůležitějších parametrů. Z těchto důvodů není tento stavební blok RLC v praxi moc používán. Použití asi od 10 kHz až do 10 MHz.

### **Pasivní filtry LC**

Jejich nevýhoda je stejně jako u pasivního filtru RLC, co se týče vlastností cívky.

### **Aktivní filtry RC (ACR)**

Tyto filtry v principu nahrazují pasivní filtry RLC. Na místo cívek se používají rezistory, kondenzátory a aktivní prvky, nejčastěji operační zesilovače (OZ). Jejich vlastnosti jsou podobné filtrům RLC, ale z důvodu jejich vlastností se jejich využití omezuje na kmitočtové pásmo asi od 0,1 Hz až do 100 kHz. Technologický vývoj umožňuje tyto filtry v současné době využívat i pro vyšší frekvence. Oproti filtrům RLC mají výhodu v nastavení filtračních vlastností, díky jednoduché změně hodnoty odporů. Nevýhoda je v napájení aktivních prvků a tím vyšší spotřebě energie.

### **Číslicové filtry**

Oproti předchozím filtrům se liší svojí realizací funkce. Využívají mikroprocesory a jejich výpočetní schopnosti. Výhodou je možnost změny filtru. Nevýhodou je omezení výpočetní schopnosti při velkých kmitočtech a vznik chyb zaokrouhlováním a kvantováním.

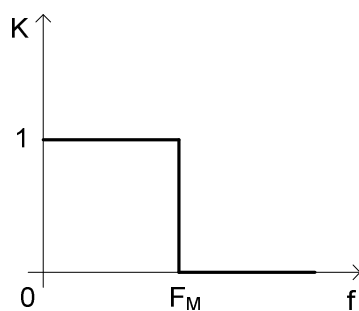
## **3.1 Typy kmitočtových filtrů podle přenášeného pásma**

Kmitočtové filtry lze dělit podle různých vlastností a hledisek. Podle funkce filtru a odpovídajícího tvaru frekvenčních charakteristik je rozdělujeme do tří základních skupin – selektivní filtry, korekční filtry a fázovací (zpožďovací) obvody.

Selektivní filtry mají za úkol potlačení přenosu kmitočtových složek signálu v nepropustném pásmu. Podle rozložení propustného a nepropustného pásma jsou to:

### **dolní propust (DP)**

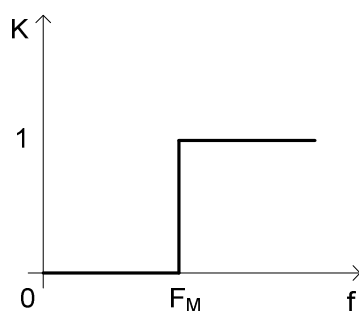
propouští pouze signál s kmitočty nižšími než mezní kmitočet  $F_M$ ,



**Obr.: 3.1 Dolní propust**

### **horní propust (HP)**

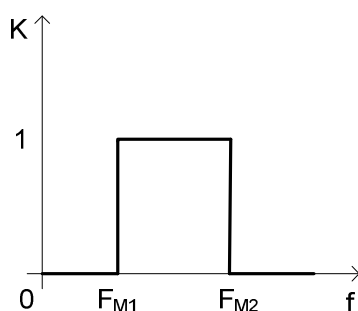
propouští pouze signál s kmitočty vyššími než mezní kmitočet  $F_M$ ,



**Obr.: 3.2 Horní propust**

### pásmová propust (PP)

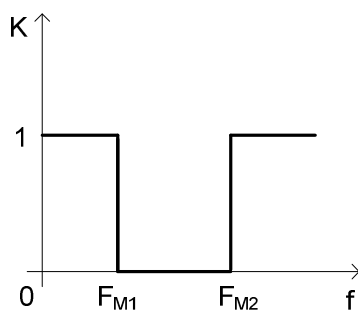
propouští pouze signál s kmitočty mezi dolním mezním kmitočtem  $F_{M1}$  a horním mezním kmitočtem  $F_{M2}$ ,



Obr.: 3.3 Pásmová propust

### pásmová zádrž (PZ)

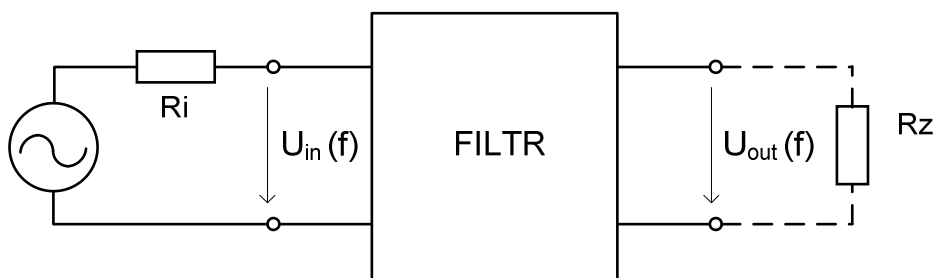
nepropouští pouze signál s kmitočty mezi dolním mezním kmitočtem  $F_{M1}$  a horním mezním kmitočtem  $F_{M2}$ ,



Obr.: 3.4 Pásmová zádrž

## 3.2 Přenos a přenosová funkce kmitočtových filtrů

Základním zapojením filtru připojeného ke zdroji harmonického signálu je filtr jako dvojhran. Prochází-li přes kmitočtový filtr harmonický signál s amplitudou  $U_{in}$ , kmitočtem  $f_{in}$  a fází  $\phi_{in}$ , získáme na výstupu filtru opět harmonický signál se stejným kmitočtem, ale jinou velikostí amplitudy a fáze ( $U_{out}$ ,  $\phi_{out}$ ). [1]



**Obr.: 3.5 Filtr jako dvojbran**

Pro měření a simulace, ze kterých je okamžitě vidět výsledný tvar kmitočtové charakteristiky, zde uvedeme několik základních obecných vzorců. Přenos  $K_{(\omega)}$  harmonického signálu filtrem lze vyjádřit jako

$$K_{(\omega)} = \frac{U_{out}}{U_{in}} = \frac{I_{out}}{I_{in}}. \quad (3.01)$$

Obecný tvar přenosové funkce filtru  $n$ -tého řádu může mít tvar

$$\begin{aligned} K(p) &= \frac{N(p)}{D(p)} = \frac{p^m a_m + p^{(m-1)} a_{(m-1)} + \dots + a_0}{b_n p^n + p^{(n-1)} b_{(n-1)} + \dots + b_0} = \\ &= K_0 \frac{\prod_m (p - n_i)}{\prod_n (p - n_j)} = K_0 \prod_k K_k(p) \end{aligned} \quad (3.02)$$

kde  $N(p)$  a  $D(p)$  jsou mnohočleny komplexní proměnné,  $p = j\omega$  a  $n_i$  jsou nulové body a  $p_j$  jsou póly přenosové funkce filtru. Reálné koeficienty jsou  $a$  a  $b$ . Obecně mocnina udává kolikátého řádu je filtr, tedy jakou má filtr strmost.

Odvozenou přenosovou funkcí lze vyjádřit komplexně

$$K_{(\omega)} = \text{Re } K + j \text{Im } K = K(\omega) e^{j\varphi(\omega)}. \quad (3.03)$$

Modulová charakteristika je dána vztahem

$$K(\omega) = |K(\omega)| = \sqrt{(\text{Re } K)^2 + (\text{Im } K)^2}. \quad (3.04)$$

Modul přenosu, který se často udává v logaritmickém měřítku (zisk filtru bude v decibelech), platí následující rovnice

$$k(\omega) = K_{dB}(\omega) = 20 \log K(\omega). \quad (3.05)$$



Argumentová neboli fázová charakteristika

$$\varphi(\omega) = \arctg \frac{\operatorname{Im} K}{\operatorname{Re} K}. \quad (3.06)$$

Úhlový kmitočet  $\omega_m$  respektive mezní frekvence  $f_m$  je definována útlumem frekvenční charakteristiky o -3 dB, (argument je  $-45^\circ$ ) a platí

$$K(\omega_m) = \frac{K_0}{\sqrt{2}}, \quad (\text{zde je } K_0 = 1) \quad (3.07)$$

$$K_{dB}(\omega_m) = K_{o\ dB} - 3, \quad (3.08)$$

V přenosové funkci 2. řádu lze přenosovou funkci dolní propusti RLC odvodit a zobecnit do následujícího tvaru

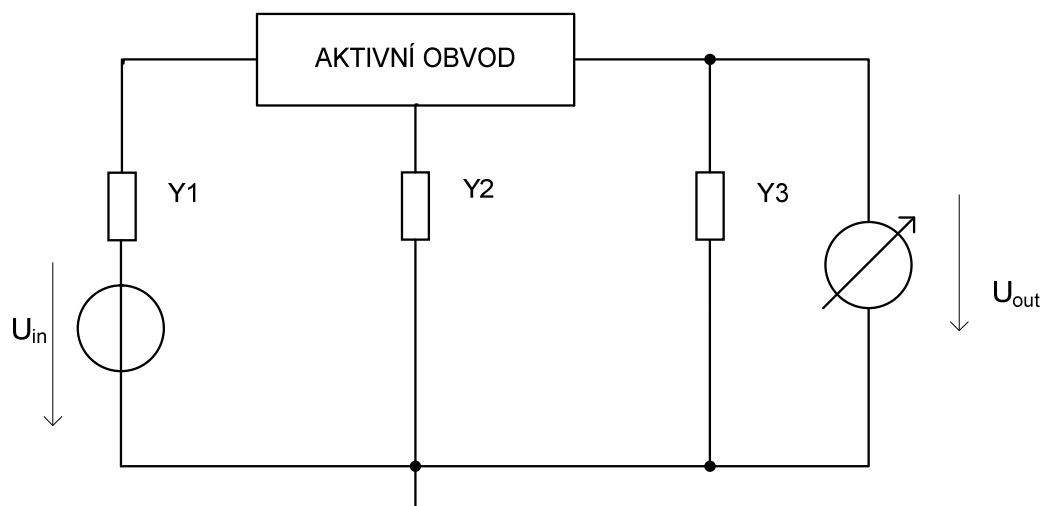
$$K(p) = \frac{a_0}{b_2 p^2 + b_1 p + b_0} [1, 2]. \quad (3.09)$$

### 3.3 Rozdělení filtrů podle druhů pracovních módů

V praxi existují elektronické obvody, které mohou fungovat ve třech pracovních režimech neboli módech. Jsou rozděleny a pojmenovány podle toho, s jakými signály filtry pracují. V současnosti se objevuje trend při návrhu elektronických obvodů, kterým je snižování napájecího napětí u integrovaných obvodů (3.3 V, 2.4 V, 1.8 V). Je to způsobeno použitou submikronovou technologií, která v souvislosti se zmenšováním rozměrů nutí používat nižší úroveň napětí. Proto převládá snaha pracovat v čistě proudovém či smíšeném módu [3, 7].

#### 3.3.1 Napěťový mód

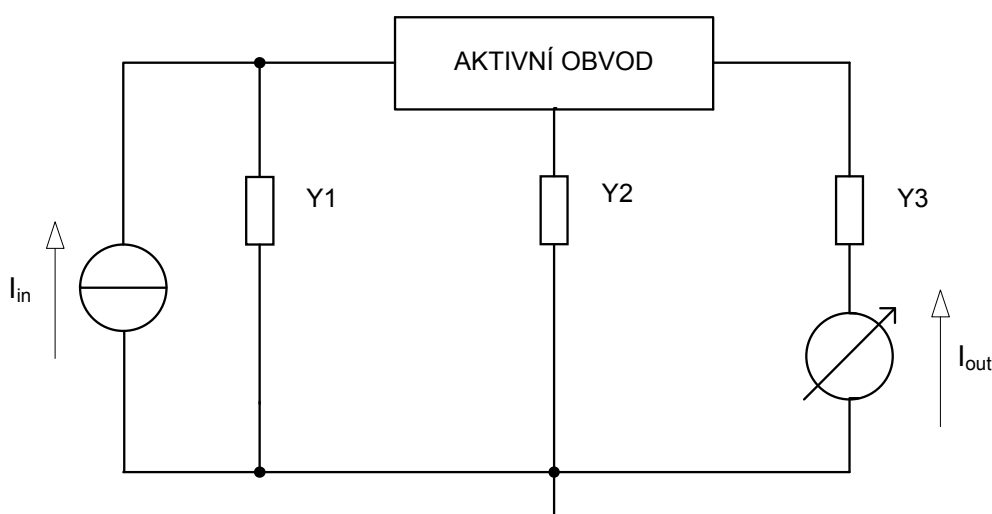
Tento pracovní mód je nejrozšířenější při konstrukci filtrů. Operační zesilovač je zde často využíván, jako aktivní prvek. Upřednostňuje se OZ s vyšším tranzitním kmitočtem. Většinou má však takové vlastnosti, které ho bohužel omezují pro použití v obvodech pracujících s vysokými kmitočty (řádově stovek kHz až MHz). Využívá se napěťových odezev signálu. Na vstupu je napěťové buzení signálu a na výstupu obvodu je napětí sledováno.



Obr.: 3.6 Napěťový mód

### 3.3.2 Proudový mód

V dnešní době se můžeme s tímto režimem setkat častěji. Jako nositele signálu nevyužívá napětí jako v minulém případě, ale informaci nese proud. Výhodou proudového módu (CM) na rozdíl od napěťového módu (VM) je fakt, že dokáže pracovat ve vyšším kmitočtovém pásmu. Na vstupu je proudové buzení obvodu připojeno mezi uzlem-zem a na výstupu se sleduje proudová odezva, snímaná z proudu tekoucího částí větve mezi dvojpólem - zemí. Obvody v CM režimu zvládají pracovat s menším napájecím napětím a nemají takový vliv na dynamický rozsah. Toto jsou některé z důvodů, proč se v současné době kmitočtové filtry stále více provozují i v proudovém módu.



Obr.: 3.7 Proudový mód

### 3.3.3 Smíšený mód

V tomto režimu část obvodu pracuje s opačným módem, než kterým je buzen. Smíšený mód je vlastně kombinací CM a VM. Pracuje-li v CM jen část obvodu, nejčastěji proudový konvejer, ale celkově obvod zpracovává signál napět'ový, jedná se o smíšený mód (V/CM). V zapojení obvodu může dále pracovat duální smíšený režim (C/VM). V tomto pracovním režimu se mnohdy používají transimpedanční a transkonduktační zesilovače (CFA) [1], [8], [9].

Smíšený mód se dá rozdělit na:

**Režim smíšený proudový (C/VM)**, kdy se při zpracování signálu využívá proudové odezvy, kdy je vstup obvodu buzen napět'ově

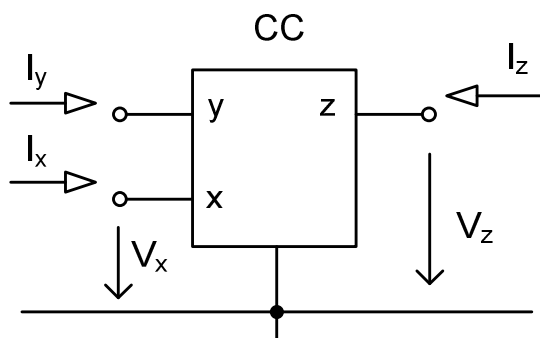
**Režim smíšený napět'ový (V/CM)**, kdy se při zpracování signálu využívá napět'ové odezvy, kdy je vstup obvodu buzen proudově

## 4 Aktivní bloky používané ve filtrech v proudovém módu

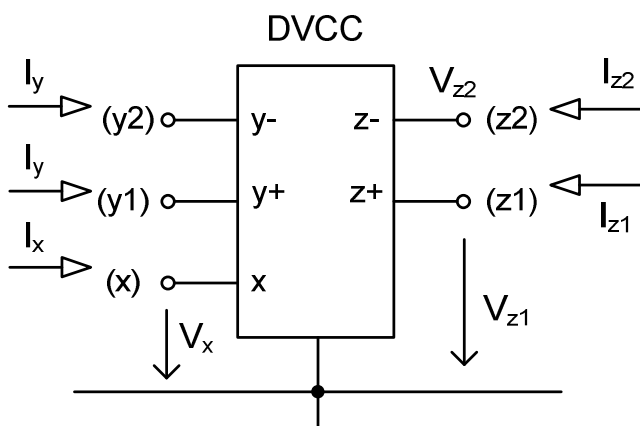
Požadavek na lepší kmitočtové vlastnosti vedou návrháře analogových obvodů stále více k použití proudového módu. V odborných publikacích se stále nacházíme zmínky o vytvoření proudového operačního zesilovače, tedy obdoby klasického diferenčního operačního zesilovače pracujícího v proudovém módu s ideálně nekonečně velkým proudovým zesílením. Snižování napájecího napětí s sebou sice nese zhoršování odstupu užitečného signálu od šumu, ale také snižování spotřeby, což představuje přínos zejména u mobilních zařízení. Dále se při práci v proudovém módu daří dosahovat větší šířky pásma [5], [6].

### 4.1 Proudové konvejory

Tyto funkční mnohohrany mají různě definované vztahy mezi branovými proudy (konvenování proudů) a jinak a nezávisle definované vztahy mezi branovými napětími. Na obrázcích jsou uvedeny nejpoužívanější proudové konvejory.



Obr.: 4.1 Konvektor CC



Obr.: 4.2 Konvektor DVCC

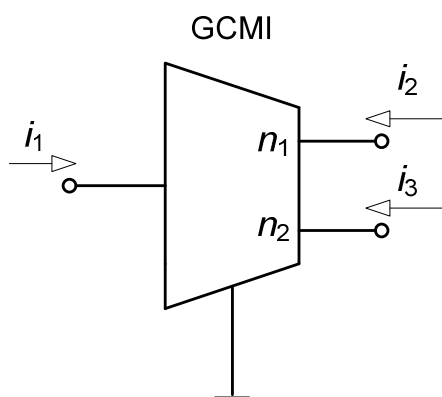
Klasický tříbranový konvektor CC, označovaný také jako CCII+, popsán následujícími vztahy mezi branovými veličinami

$$u_X = u_Y, \quad i_Y = 0, \quad i_Z = i_X. \quad (4.01)$$

Operační zesilovače nemají tak dobré kmitočtové vlastnosti jako proudové konvejory. Výhodně se dají použít v ARC filtrech v proudovém módu. Nově se objevují proudové konvejory použitelné pro širší využití a netradiční aplikace v proudovém módu. Pětibranový proudový konvektor se zdá být nejvhodnější, díky svému napěťovému vstupu a vyváženému proudovému výstupu [2].

## 4.2 Popis GCMI

Zobecněný prvek GCMI (Generalized Current Mirror and Inverter) se zavedl pro zjednodušení návrhu nových obvodových struktur. Vývoj těchto prvků je za účelem rozšiřování zpracovávaného kmitočtového pásma a udržení odstupů signálu od šumu i při nízkých napájecích napětích. Jeho ideální model lze definovat dvěma zdroji proudu řízených společným proudem. Tento prvek je zamýšlen pro použití v aplikacích, jejichž obvody pracují v čistě proudovém módu.



Obr.: 4.3 GCMI

U GCMI jsou výstupní proudy dány vztahy  $i_2 = n_1 i_1$  ,  $i_3 = n_2 i_1$  , kde  $n_1$  a  $n_2$  jsou obecné proudové přenosy, které mohou nabývat hodnot +1 nebo -1 [5].

## 5 Multifunkční kmitočtový filtr v proudovém módu

Obvody v proudovém módu mají jednodušší návrhový přístup a tím i většinou lepší obvodovou strukturu. Trendem, který je možné v současné době sledovat, je požadavek na vývoj obvodů schopných zajistit více než jednu funkci, tzv. multifunkčních obvodů [5], [7].

### 5.1 Návrh filtru autonomní metodou

Při návrhu autonomního obvodu se může postupovat intuitivně. Výhodnější je však vyjít z obecné admitanční sítě připojené ke dvěma prvkům GCMI. Tato metoda je však vhodná především pro filtry druhého řádu s omezeným počtem aktivních prvků, neboť s jejich rostoucím počtem značně narůstá i počet pasivní admitanční sítě a hledání vhodného autonomního obvodu je tak značně problematické. Metodu návrhu autonomního obvodu můžeme zobecnit do následujících kroků:

návrh autonomního obvodu (obsahující pouze GCMI a admitance),

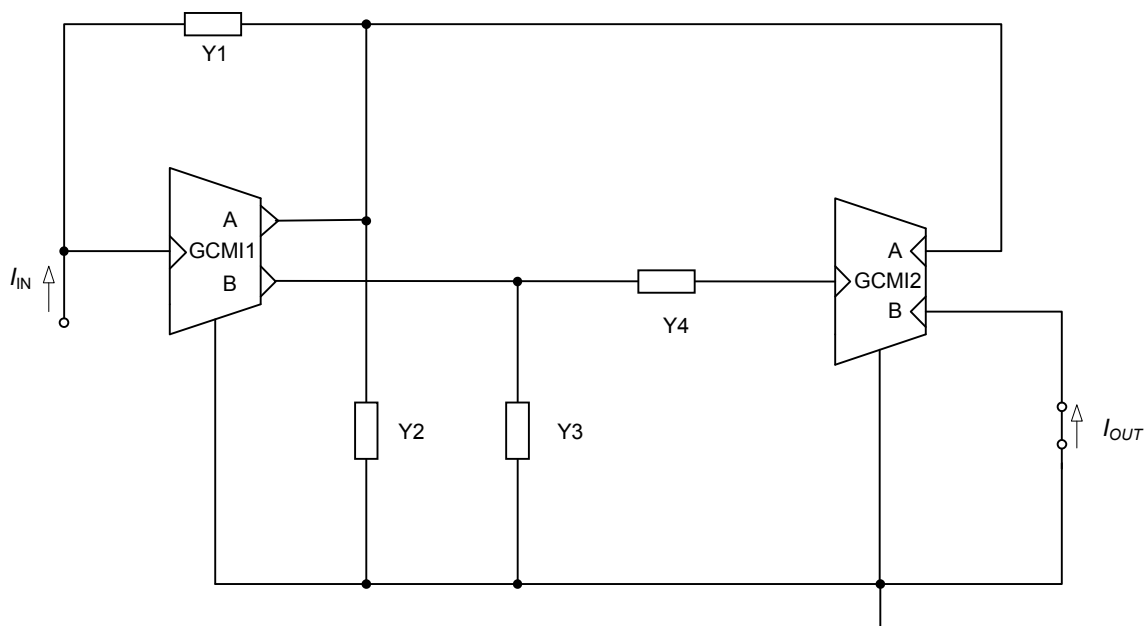
výpočet charakteristické rovnice daného obvodu,

volba přenosových koeficientů a splnění stability obvodu,

nahrazení admitancí rezistory a kondenzátory,

volba umístění vstupů a výstupů v obvodu (proudové vstupy se připojí pouze do uzlů obvodu, proudové výstupy se měří pouze ve smyčkách obvodu),

zjištění přenosové funkce z jednotlivých kombinací vstupů a výstupů.



**Obr.: 5.1 Schéma GCMII prvky Y**

Při návrhu umístění vstupu a výstupu je nutné brát v úvahu, aby charakteristická rovnice byla v co nejjednodušší podobě. Umístění vstupu volíme tak, aby vstupní proud směřoval do uzlu obvodu a výstup proudu z větve obvodu. Zjišťovaná rovnice je vlastně jmenovatelem rovnice přenosu simulace Ki v programu SNAP32.

V návrhu byly zvoleny konkrétně koeficienty v součástkách GCMII ve výstupech A a B tak, jak jsou naznačeny ve schématu. Šipka směřující ven ze součástky GCMII znázorňuje koeficient  $n = -1$ , naopak šipka směřující dovnitř znázorňuje koeficient  $n = 1$ . Součástky  $Y_1 - Y_4$  jsou admitance. Simulací získáme charakteristickou rovnici. Admitance jsou vodivosti G s hodnotou 1ms.

Charakteristická rovnice vypočítaná pomocí programu SNAP32 je

$$D = Y_4 Y_1 + Y_4 Y_2 + Y_3 Y_2. \quad (5.01)$$

Dalším krokem k úspěšnému návrhu filtru je zvolení správných součástek (prozatím vodivostí a kapacit) na místo prvků  $Y_1$  až  $Y_4$ . Abychom dosáhli filtru druhého řádu, musíme dostat charakteristickou rovnici do tvaru

$$D = p^2 A_2 + p A_1 + A_0, \quad (5.02)$$

(kde  $p = j\omega$ ).

Proto si vytvoříme tabulku s možnými variantami pasivních prvků:

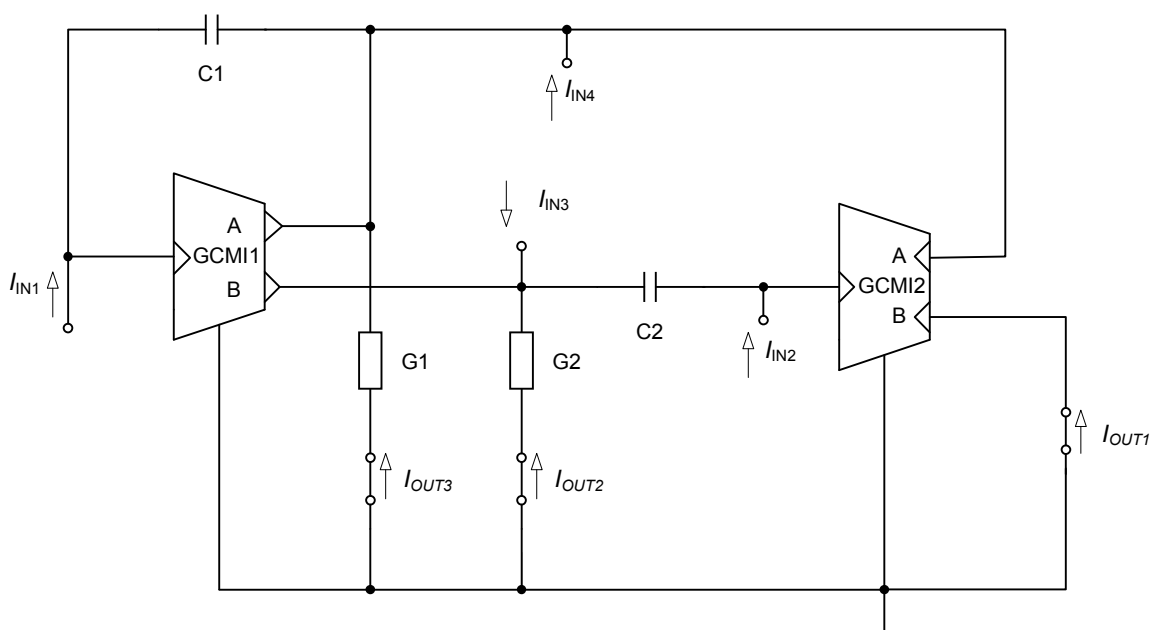
Varianta	Y1	Y2	Y3	Y4
A	G1	pC1	G2	pC2
B	G1	G2	pC1	pC2
C	pC1	G1	G2	pC2

Do charakteristické rovnice dosadíme za Y1 až Y4 podle Tabulky 1. Správný tvar rovnice dostaneme po dosazení podle varianty C.

$$D(C) = pC_2 * pC_1 + pC_2 * G_1 + G_2 * G_1 \quad (5.03)$$

$$D = p^2 C_2 C_1 + pC_2 G_1 + G_2 G_1 \quad (5.04)$$

Prvotní schéma s admitancemi Y<sub>1</sub> až Y<sub>4</sub> nahradíme schématem s pasivními prvky podle tabulky varianta C. Hodnoty součástek v následujícím schématu jsou C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub> = 10nF a G<sub>1</sub>, G<sub>2</sub> = 1mS. Vstup a výstup multifunkčního obvodu se budeme snažit umístit tak, aby po simulaci Ki v programu SNAP32 vyšla charakteristická rovnice nejprve v podobě pro dolní propust. Podobným způsobem postupujeme i při zjišťování zapojení vstupu a výstupu pro pásmovou propust a horní propust (viz níže).



Obr.: 5.2 Schéma GCMII prvky G C



Rovnice pro dolní propust

$$K_{LP} = \frac{I_{OUT3}}{I_{IN1}} = \frac{-G_1 G_2}{D}. \quad (5.05)$$

Rovnice pro pásmovou propust

$$K_{BP} = \frac{I_{OUT3}}{I_{IN3}} = \frac{p C_2 G_2}{D}. \quad (5.06)$$

Rovnice pro horní propust

$$K_{HP} = \frac{I_{OUT1}}{I_{IN4}} = \frac{p^2 C_1 C_2}{D} [7]. \quad (5.07)$$

Výpočet pasivních prvků pro zadání filtru s charakteristickým mezním kmitočtem  $f_M = 1\text{MHz}$  s činitelem jakosti  $Q = \frac{1}{\sqrt{2}} \doteq 0,707$ .

$$b_2 \quad b_1 \quad b_0$$

$$D = p^2 C_2 C_1 + p C_2 G_1 + G_2 G_1$$

$$\omega_0 = 2\pi f = \sqrt{\frac{b_0}{b_2}} = \sqrt{\frac{G_1 G_2}{C_1 C_2}} = 2\pi * 1000000$$

$$Q_0 = \sqrt{\frac{b_2 b_0}{b_1^2}} = \sqrt{\frac{C_1 C_2 * G_1 G_2}{G_1^2 * C_2^2}} = \sqrt{\frac{C_1 G_2}{G_1 C_2}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \doteq 0,707$$

Zvolíme si hodnotu kondenzátorů  $C_1 = C_2 = 100\text{pF}$  a soustavou rovnic dopočítáme hodnoty rezistorů  $R_1$  a  $R_2$ .

$$\omega_0 = \frac{1}{C_1} * \sqrt{G_1 G_2} = \frac{1}{C_1 * \sqrt{R_1 R_2}}$$

$$Q_0 = \sqrt{\frac{G_2}{G_1}} = \sqrt{\frac{R_1}{R_2}}$$

$$2\pi * 1E^6 = \frac{1}{1E^{-10} * \sqrt{R_1 R_2}}$$

$$\frac{1}{\sqrt{2}} = \sqrt{\frac{R_1}{R_2}}$$

---


$$2\pi * 1E^{-4} * \sqrt{R_1 R_2} = 1$$

$$\left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right)^2 = \frac{R_1}{R_2}$$

---


$$(2\pi * 1E^{-4})^2 * R_1 * R_2 = 1$$

$$\left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right)^2 R_2 = R_1$$

Dosadíme  $R_1$  do první rovnice a dostáváme:

$$(2\pi * 1E^{-4})^2 * \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right)^2 * R_2 * R_2 = 1$$

$$1E^{-4} * 4,442R_2 = 1$$

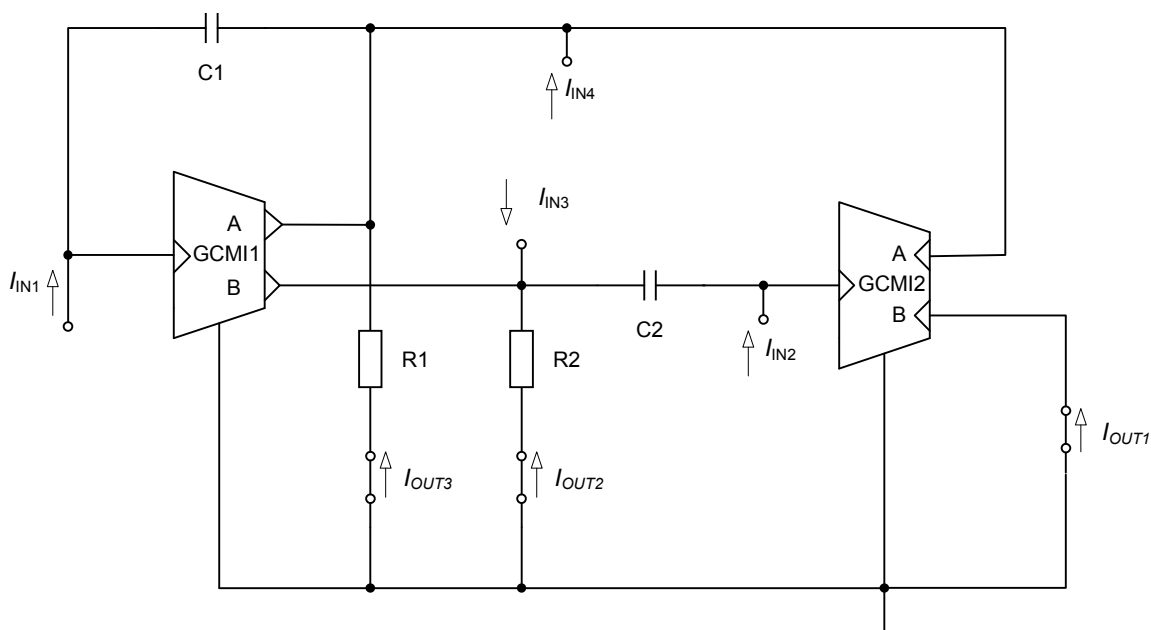
$$R_2 \doteq 2250,8\Omega$$

Dále dosadíme  $R_2$  do rovnice:

$$\left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right)^2 R_2 = R_1$$

$$\left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right)^2 * 2250,8 = R_1$$

$$R_1 \doteq 1125,4\Omega$$



**Obr.: 5.3 Schéma GCMC prvky R C**

$K_0$  – přenos v propustném pásmu – nejlépe  $\pm 1$  (0dB)

Přenos pro dolní propust

$$K_{0LP} = \frac{a_0}{b_0} = \frac{-G_1 G_2}{G_1 G_2} = -1.$$

Přenos pro pásmovou propust

$$K_{0BR} = \frac{a_1}{b_1} = \frac{C_2 G_1}{G_1 C_2} = 1.$$

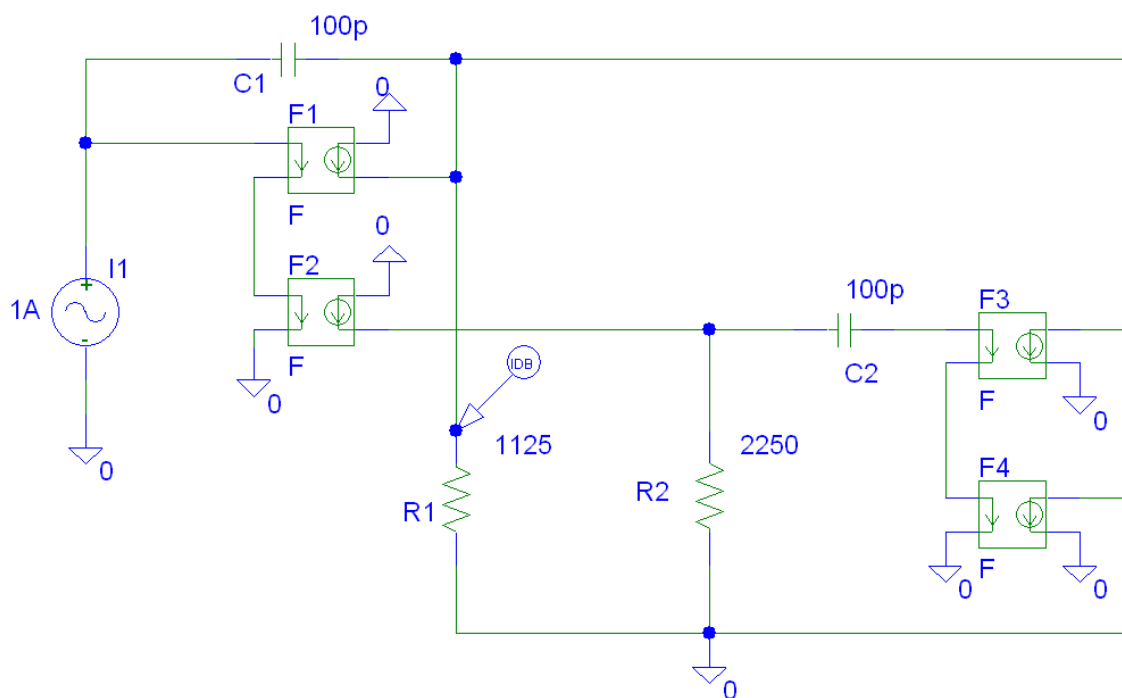
Přenos pro horní propust

$$K_{0HP} = \frac{a_2}{b_2} = \frac{C_1 C_2}{C_1 C_2} = 1.$$

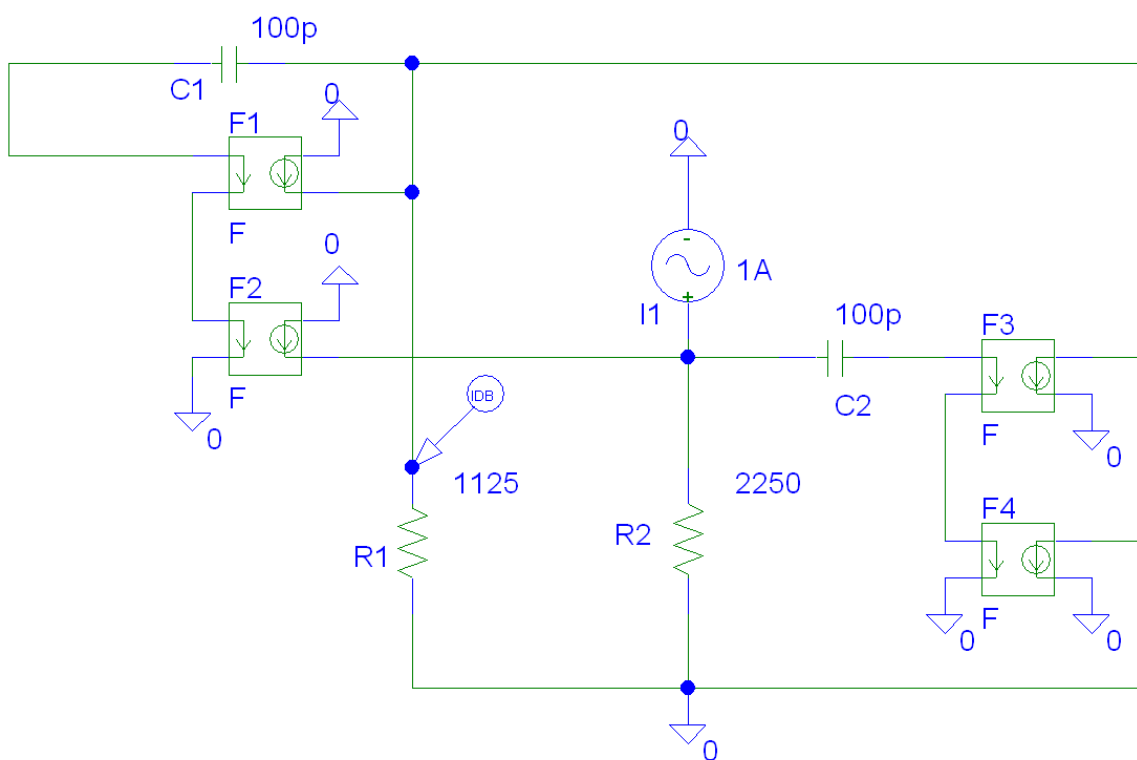
## 5.2 Nahrazení prvku GCMC zdrojem proudu řízeným proudem

Modelování frekvenčních charakteristik jsem provedl v programu Orcad PSpice. Použil jsem tato následující zapojení bez parazitních vlastností pro vytvoření ideální kmitočtové charakteristiky.

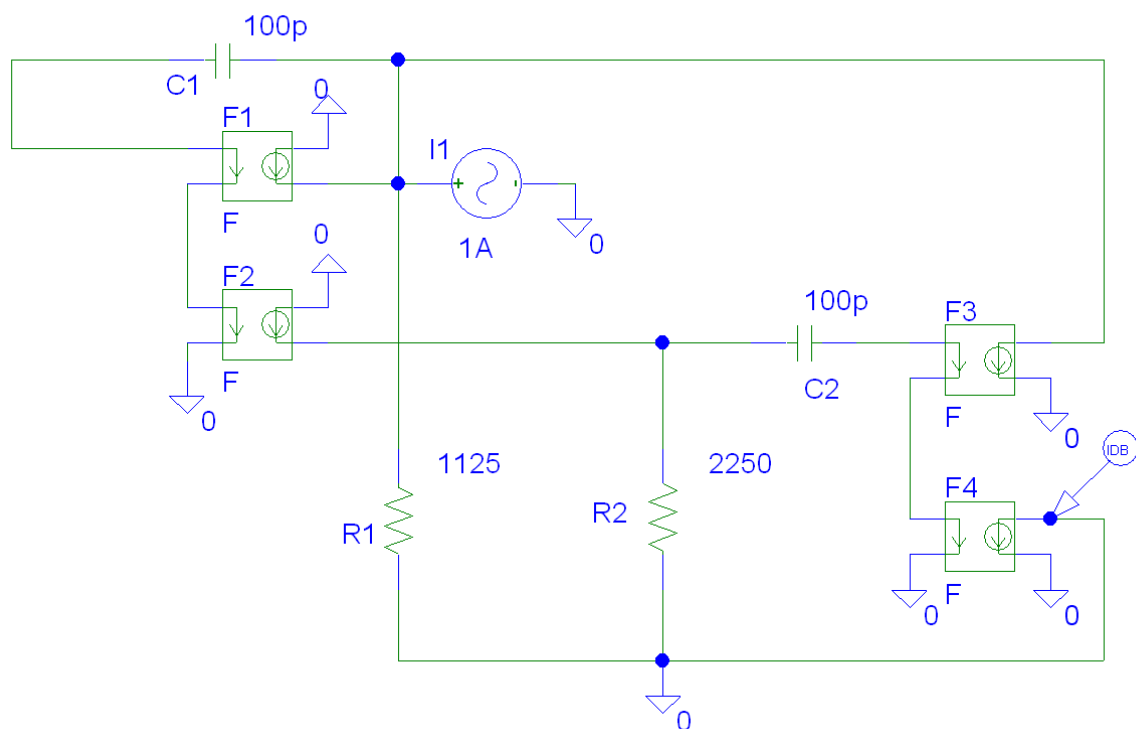
V modelech zapojení představují prvky F zdroje proudu řízené proudem. Proudový vstup je  $I_1 = 1A$  a výstup je měřen proudovou sondou IDB. Hodnoty součástek jsou dle provedeného výpočtu (viz. Návrh filtru autonomní metodou).



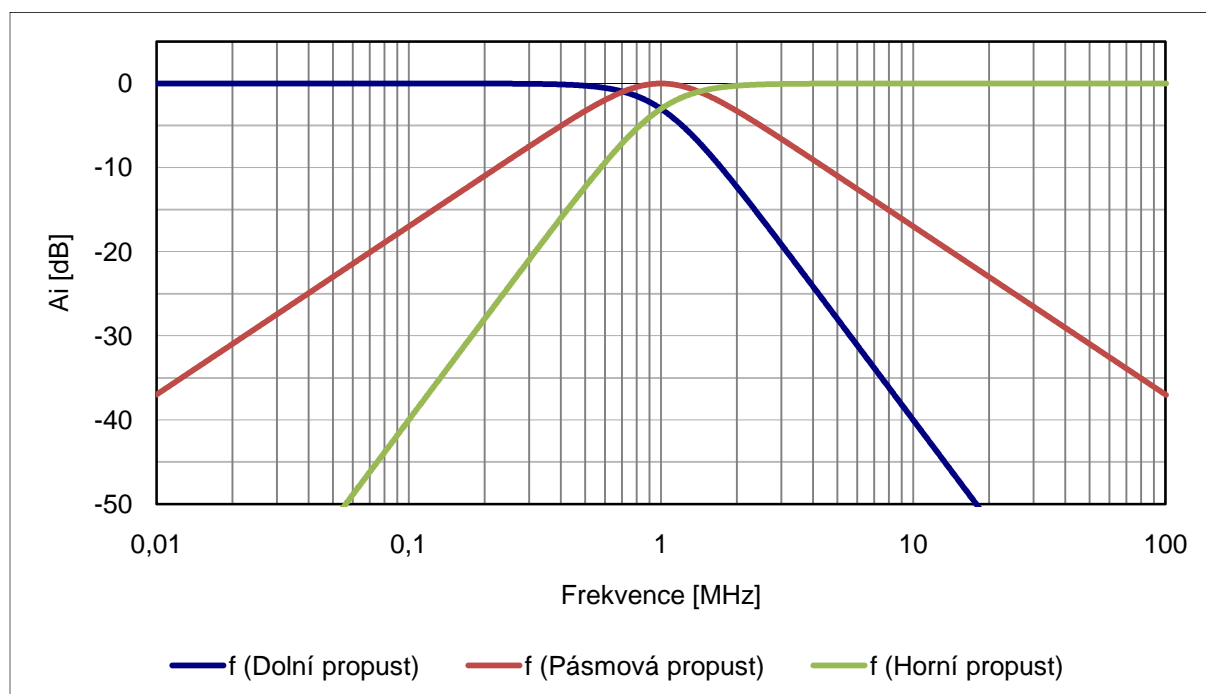
Obr.: 5.4 Model zapojení DP (F)



Obr.: 5.5 Model zapojení PP (F)



Obr.: 5.6 Model zapojení HP (F)



Obr.: 5.7 Ideální charakteristiky multifunkčního filtru za použití součástek GCM

Charakteristiky kmitočtového filtru jsou správně s mezním kmitočtem  $F_M = 1\text{MHz}$  a poklesem  $-40\text{dB/dek}$ . Simulací jsme se přesvědčili o správnosti výpočtu pasivních prvků.

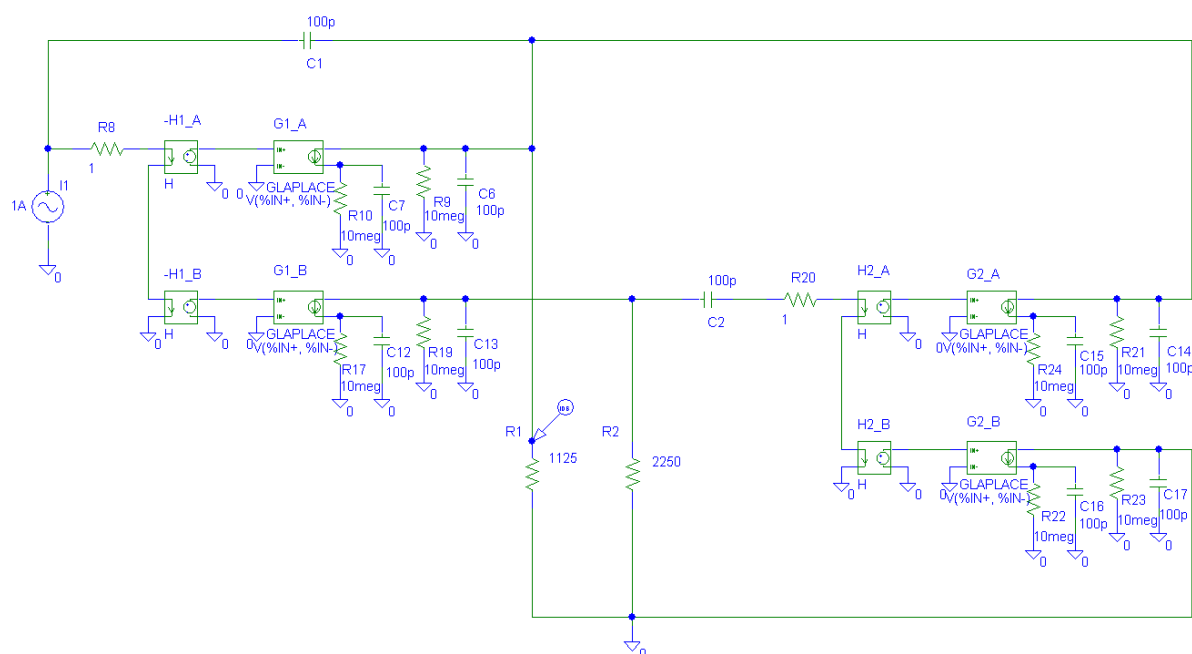
## 5.3 Nahrazení prvku GCMI aktivními prvky s parazitními vlastnostmi

Použil jsem tato následující zapojení v programu Orcad PSpice pro vytvoření parazitních vlastností které se projeví ve frekvenčních charakteristikách.

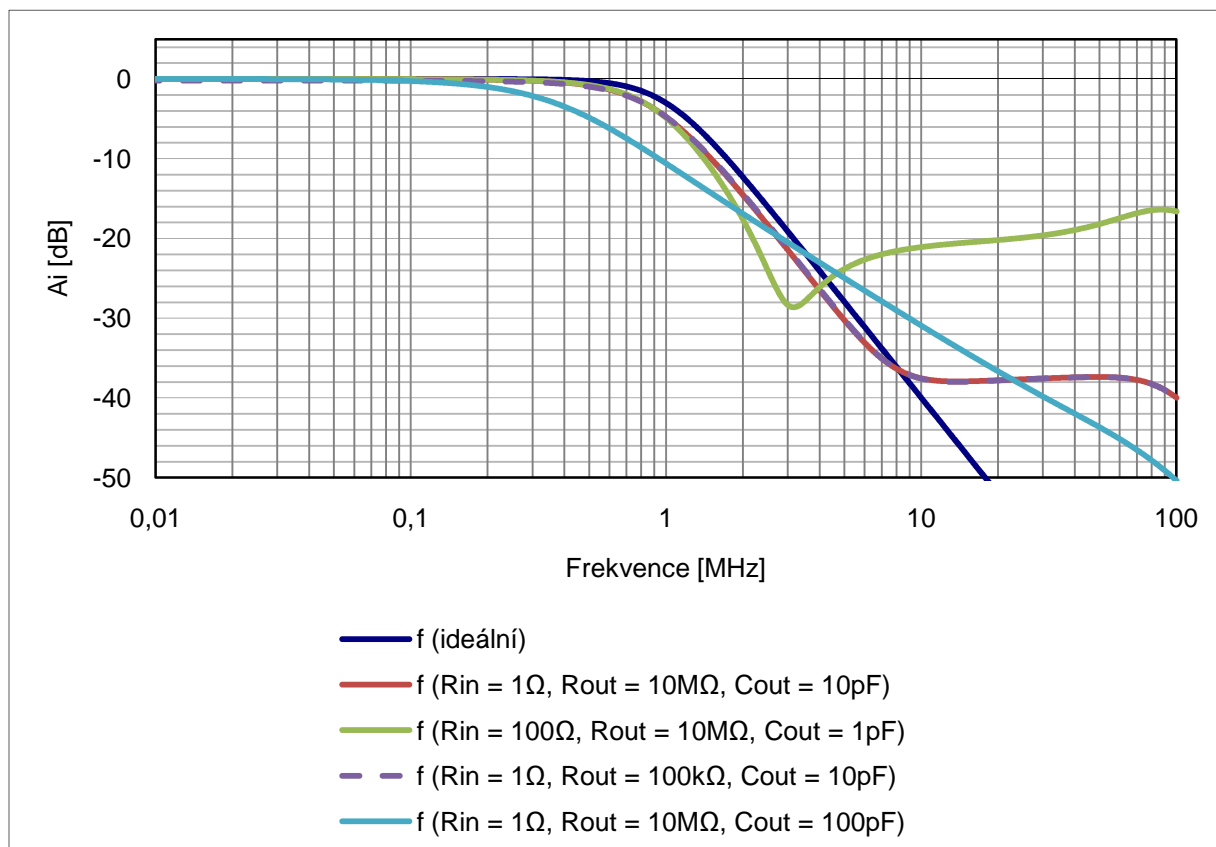
V modelech zapojení představují prvky H zdroje napětí řízené proudem a prvky G zdroje proudu řízené napětím. Takto zapojená kombinace obou prvků nahrazuje prvek F z předchozí simulace. Proudový vstup je  $I_1 = 1A$  a výstup je měřen proudovou sondou IDB. Hodnoty součástek  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $R_1$ ,  $R_2$  jsou dle provedeného výpočtu (viz. Návrh filtru autonomní metodou).

Ostatní pasivní součástky vytváří parazitní vlastnosti GCMI použitého v obvodu (v tomto modelu nahrazeným prvky H a G). Rezistory  $R_8$ ,  $R_{20}$  – vstupní parazitní odpor, rezistory  $R_{10}$ ,  $R_9$ ,  $R_{17}$ ,  $R_{19}$ ,  $R_{24}$ ,  $R_{21}$ ,  $R_{22}$ ,  $R_{23}$  – výstupní parazitní odpor, kondenzátory  $C_7$ ,  $C_6$ ,  $C_{12}$ ,  $C_{13}$ ,  $C_{15}$ ,  $C_{14}$ ,  $C_{16}$ ,  $C_{17}$  – výstupní parazitní kapacita.

### 5.3.1 Srovnání charakteristik s různými parazitními vlastnostmi – Dolní propust



Obr.: 5.8 Model zapojení DP (H,G)



Obr.: 5.9 Dolní propust - srovnání charakteristik dle parazitních prvků

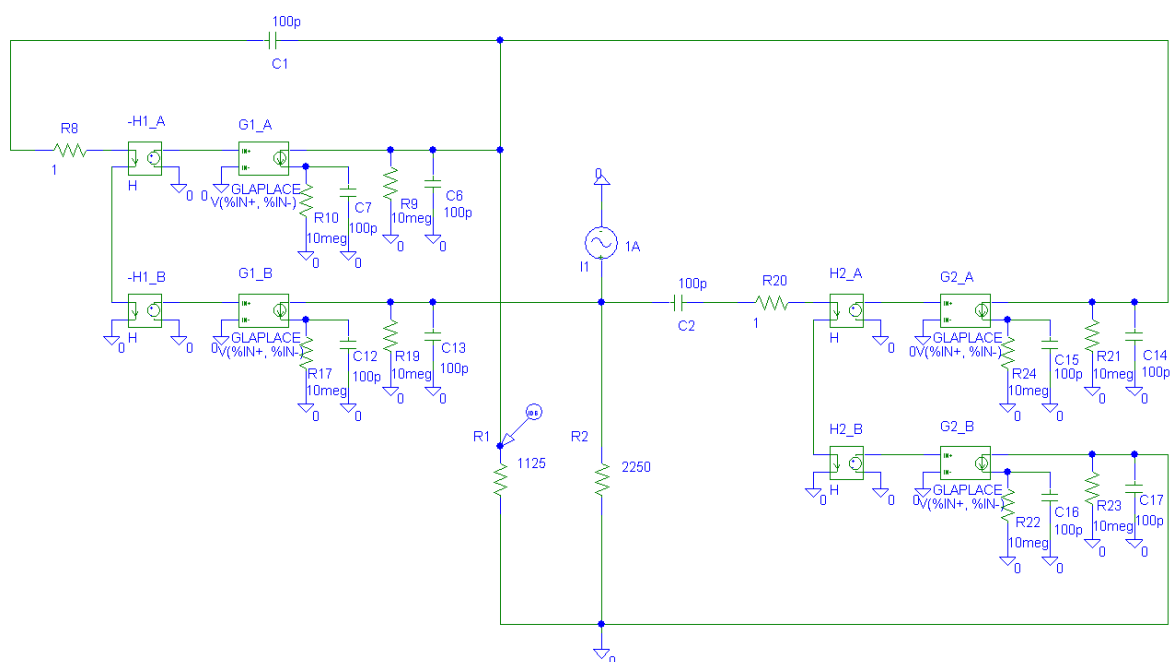
Změnou parazitního vstupního odporu  $R_{in}$  v Modelu zapojení DP na obr.5.9 (rezistory R8, R20) snižuje zesílení. V případě dolní propusti se zmenší zeslabení oproti ideální  $f_{ci}$ , což je patrné z grafu obr.5.9 přenosové funkce pro  $f$  ( $R_{in} = 100\Omega$ ,  $R_{out} = 10M\Omega$ ,  $C_{out} = 1pF$ ). Zesílení je podle vzorce

$$A_i[dB] = 20 \log \frac{I_{out}[A]}{I_{in}[A]} \quad (5.08)$$

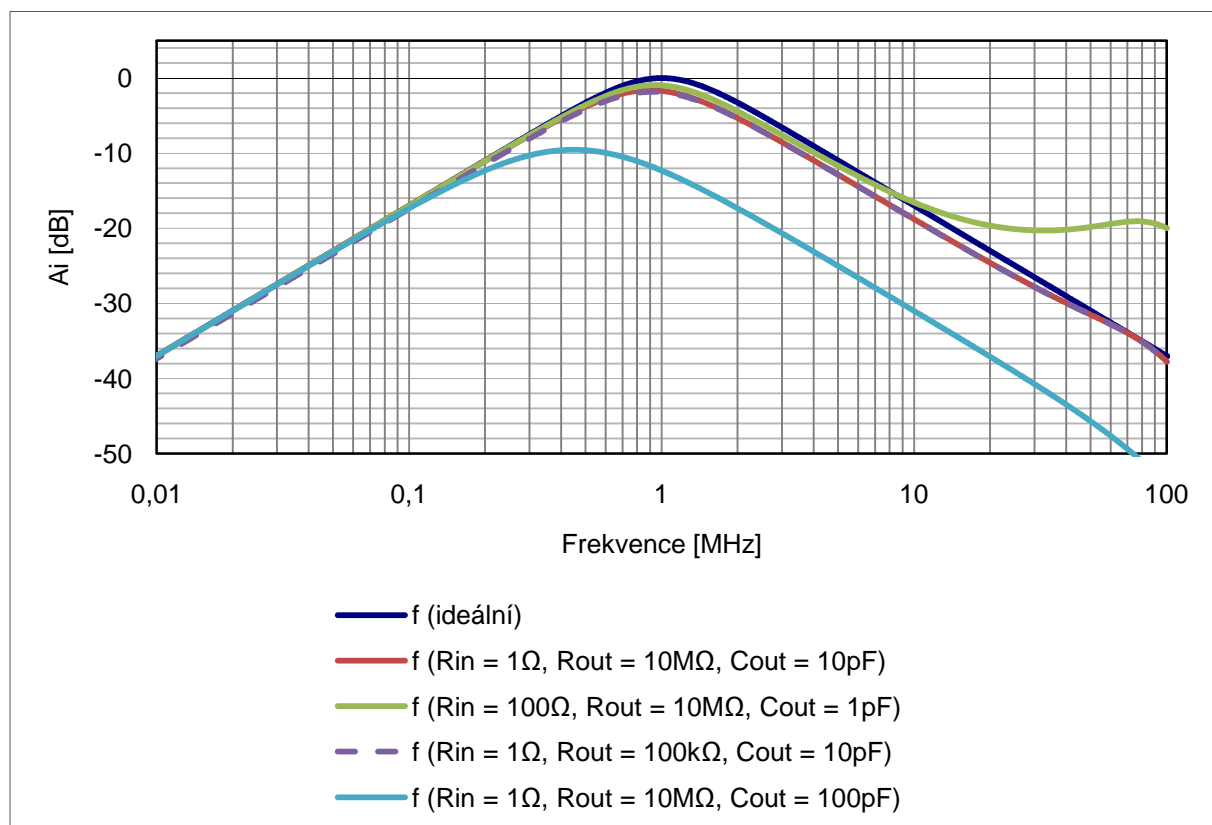
Při pohledu na graf obr.5.9  $f(R_{in} = 1\Omega$ ,  $R_{out} = 100k\Omega$ ,  $C_{out} = 10pF$ ) změna parazitního výstupního odporu  $R_{out}$  v Modelu zapojení DP na obr.1255 (rezistory R9, R10, R17, R19, R24, R21, R22, R23) neovlivňuje zesílení.

Parazitní výstupní kapacita  $C_{out}$  v Modelu zapojení DP na obr.5.9 (kondenzátory C7, C8, C12, C13, C15, C14, C16, C17) snižuje mezní frekvenci Modelu zapojení DP změnou časové konstanty  $\tau$  (vlastností jí charakteristickou, tedy tak, že kondenzátor propouští vysoké frekvence). V tomto případě signál o vysokém kmitočtu propouští na zem. V průběhu  $f(R_{in} = 1\Omega$ ,  $R_{out} = 10M\Omega$ ,  $C_{out} = 100pF$ ) je to patrné. Mezní frekvence se snížila na hodnotu  $f_m(R_{in} = 1\Omega$ ,  $R_{out} = 10M\Omega$ ,  $C_{out} = 100pF) = 0,2$  MHz a je zde pokles -20dB/dek (místo -40dB/dek).

### 5.3.2 Srovnání charakteristik s různými parazitními vlastnostmi – Pásmová propust



Obr.: 5.10 Model zapojení PP (H,G)



Obr.: 5.11 Pásmová propust - srovnání charakteristik dle parazitních prvků

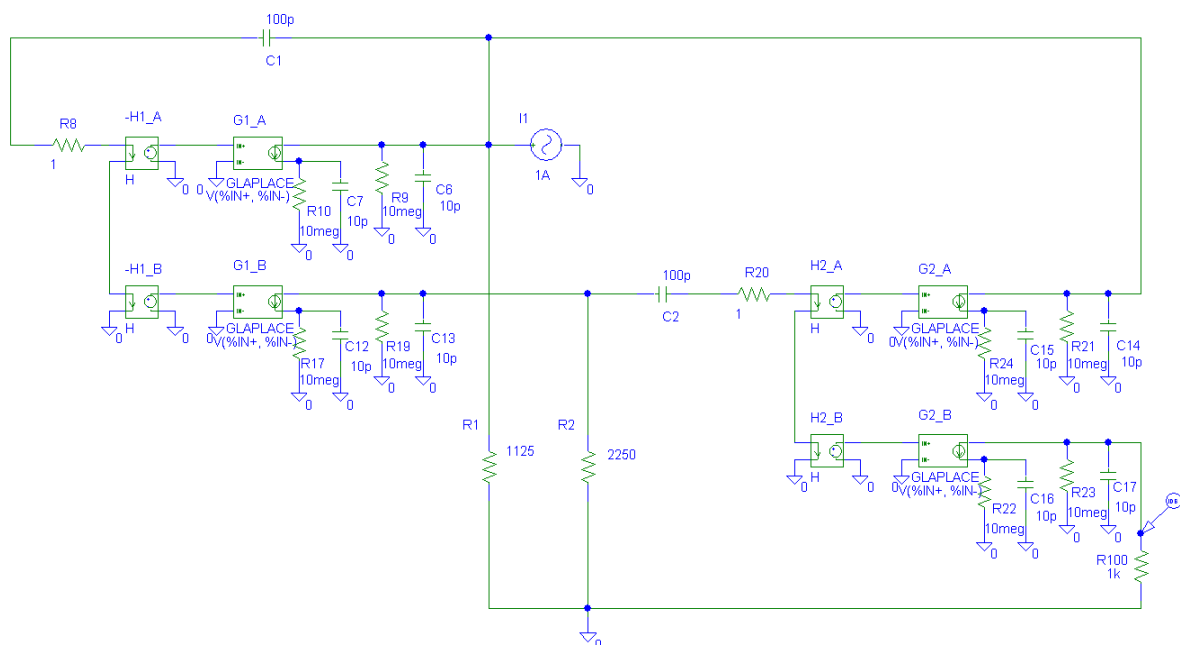


Zvýšení parazitního vstupního odporu  $R_{in}$  v Modelu zapojení PP na obr.5.11 (rezistory R8, R20) snižuje zesílení. V případě pásmové propusti se zmenší zeslabení oproti ideální fci, což je patrné z grafu obr.5.11 přenosové funkce pro  $f$  ( $R_{in} = 100\Omega$ ,  $R_{out} = 10M\Omega$ ,  $C_{out} = 1pF$ ). Zároveň je patrné, že toto zmenšení zeslabení, je pouze v oblasti vysokých kmitočtů nad 10MHz.

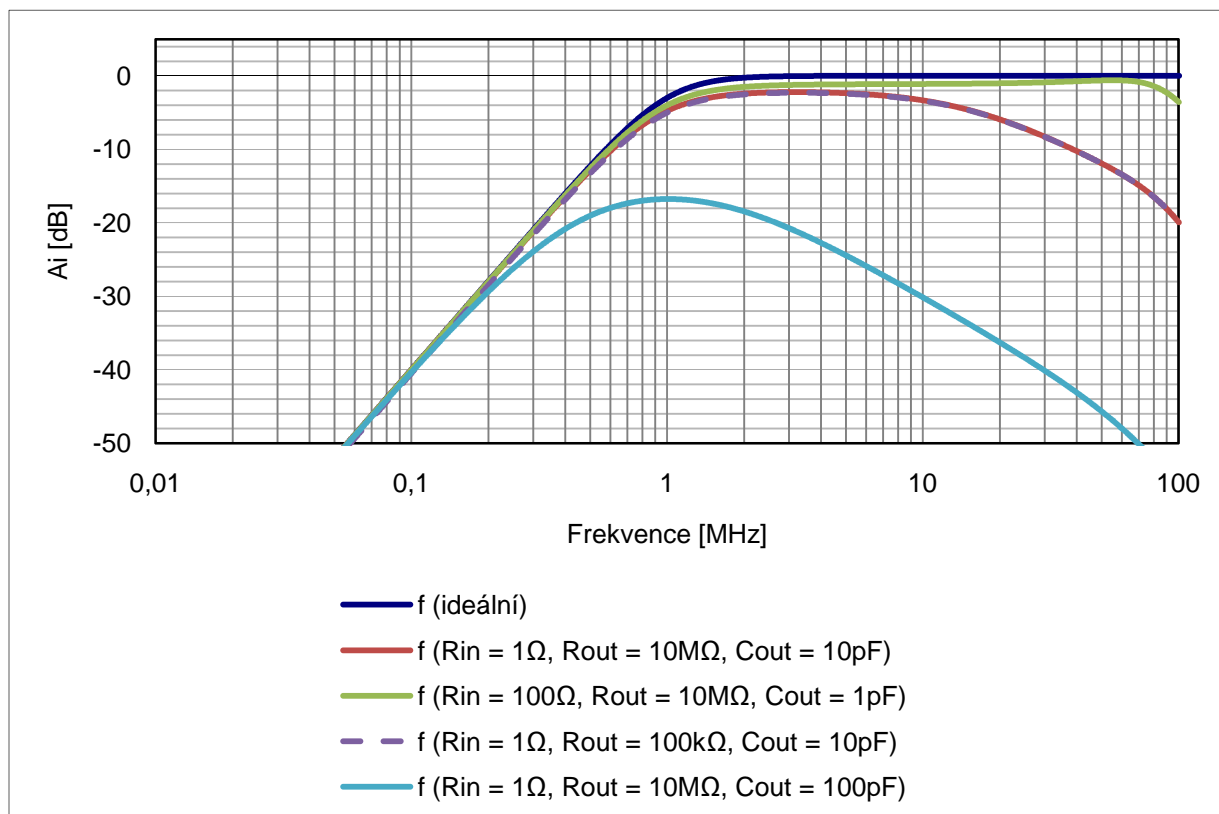
Změna parazitního výstupního odporu  $R_{out}$  v Modelu zapojení PP na obr.5.11 (rezistory R9, R10, R17, R19, R24, R21, R22, R23) neovlivňuje zesílení. Důkazem je graf xy  $f$  ( $R_{in} = 1\Omega$ ,  $R_{out} = 100k\Omega$ ,  $C_{out} = 1pF$ ).

Parazitní výstupní kapacita  $C_{out}$  v Modelu zapojení PP na obr.xy (kondenzátory C7, C8, C12, C13, C15, C14, C16, C17) snižuje mezní frekvenci Modelu zapojení PP změnou časové konstanty  $\tau$  (vlastností jí charakteristickou, tedy tak, že kondenzátor propouští vysoké frekvence). V tomto případě signál o vysokém kmitočtu propouští na zem. V průběhu  $f$  ( $R_{in} = 1\Omega$ ,  $R_{out} = 10M\Omega$ ,  $C_{out} = 100pF$ ) je to patrné. Mezní frekvence se snížila na hodnotu  $f_m(R_{in} = 1\Omega, R_{out} = 10M\Omega, C_{out} = 100pF) = 0,45MHz$ . Zároveň se od této frekvence snížilo zesílení na -10dB.

### 5.3.3 Srovnání charakteristik s různými parazitními vlastnostmi – Horní propust



Obr.: 5.12 Model zapojení HP



**Obr.: 5.13 Horní propust - srovnání charakteristik dle parazitních prvků**

V tomto modelu zapojení měříme výstupní signál na pomocném odporu  $R_{100}$ .

V Modelu zapojení HP na obr.5.13 zlepšují vlastnosti horní propusti zvýšení parazitního vstupního odporu  $R_{in}$  (rezistory  $R_8$ ,  $R_{20}$ ) a zároveň snížení parazitní výstupní kapacita  $C_{out}$  (kondenzátory  $C_7$ ,  $C_8$ ,  $C_{12}$ ,  $C_{13}$ ,  $C_{15}$ ,  $C_{14}$ ,  $C_{16}$ ,  $C_{17}$ ). Z grafu xy přenosové funkce pro  $f$  ( $R_{in} = 100\Omega$ ,  $R_{out} = 10M\Omega$ ,  $C_{out} = 1pF$ ) je patrné, že funkce zůstává stabilně od mezního kmitočtu na -2dB a nezmenšuje svoji hodnotu zesílení až do 80MHz.

Při pohledu na graf obr.5.13  $f$  ( $R_{in} = 1\Omega$ ,  $R_{out} = 100k\Omega$ ,  $C_{out} = 10pF$ ) změna parazitního výstupního odporu  $R_{out}$  v Modelu zapojení HP na obr. 5.13 (rezistory  $R_9$ ,  $R_{10}$ ,  $R_{17}$ ,  $R_{19}$ ,  $R_{24}$ ,  $R_{21}$ ,  $R_{22}$ ,  $R_{23}$ ) mění zesílení na vyšších kmitočtech. Od 10MHz začne charakteristika klesat o -14dB/dek. Příčinou je, že větší kondenzátor snáze propustí vyšší kmitočty na zem.

Zvětšením parazitní výstupní kapacita  $C_{out}$  v Modelu zapojení HP na obr.5.13 (kondenzátory  $C_7$ ,  $C_8$ ,  $C_{12}$ ,  $C_{13}$ ,  $C_{15}$ ,  $C_{14}$ ,  $C_{16}$ ,  $C_{17}$ ) dojde ke snížení zesílení o -16dB na mezní frekvenci. V grafu xy  $f$  ( $R_{in} = 1\Omega$ ,  $R_{out} = 100k\Omega$ ,  $C_{out} = 100pF$ ) se model filtru horní propusti začne chovat obdobně, jako pásmová propust. Od mezní frekvence je pokles zesílení asi -10dB/dek.

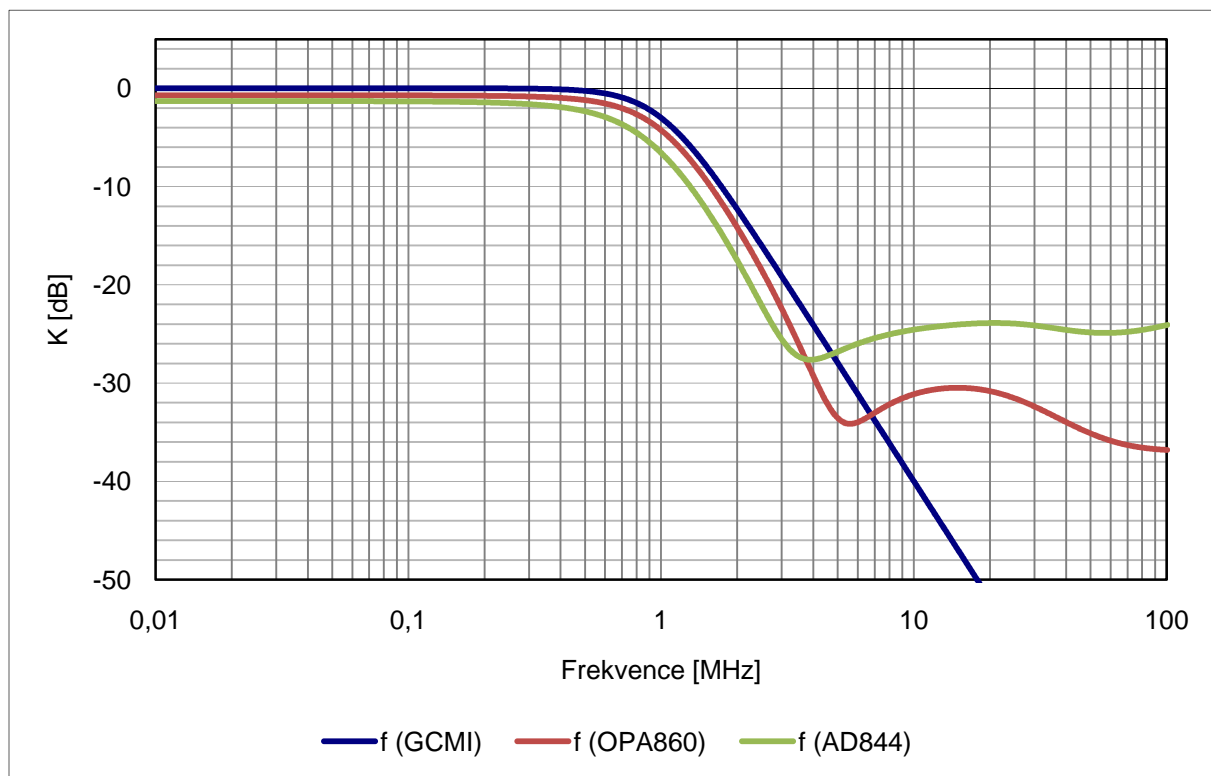
## 5.4 Model multifunkčního filtru ze součástek OPA860 a AD844

V tomto simulačním modelu je prvek GCMI nahrazen proudovými konvejory v podobě reálných součástek OPA860 a v druhém modelu AD844. Celý model je zapojen v proudovém módu. Do modelu je zahrnuté napájení aktivních prvků  $\pm 5V$ . Vstupní napěťový signál je převáděn (převodníkem napětí na proud) na proudový signál a je jím buzen vstupní uzel (IN1, IN4, IN3). Výstupní signál je sondou snímám na smyčce obvodu označené jako OUT3 a OUT1. Modely simulovaných zapojení jsou v příloze (Příloha1).

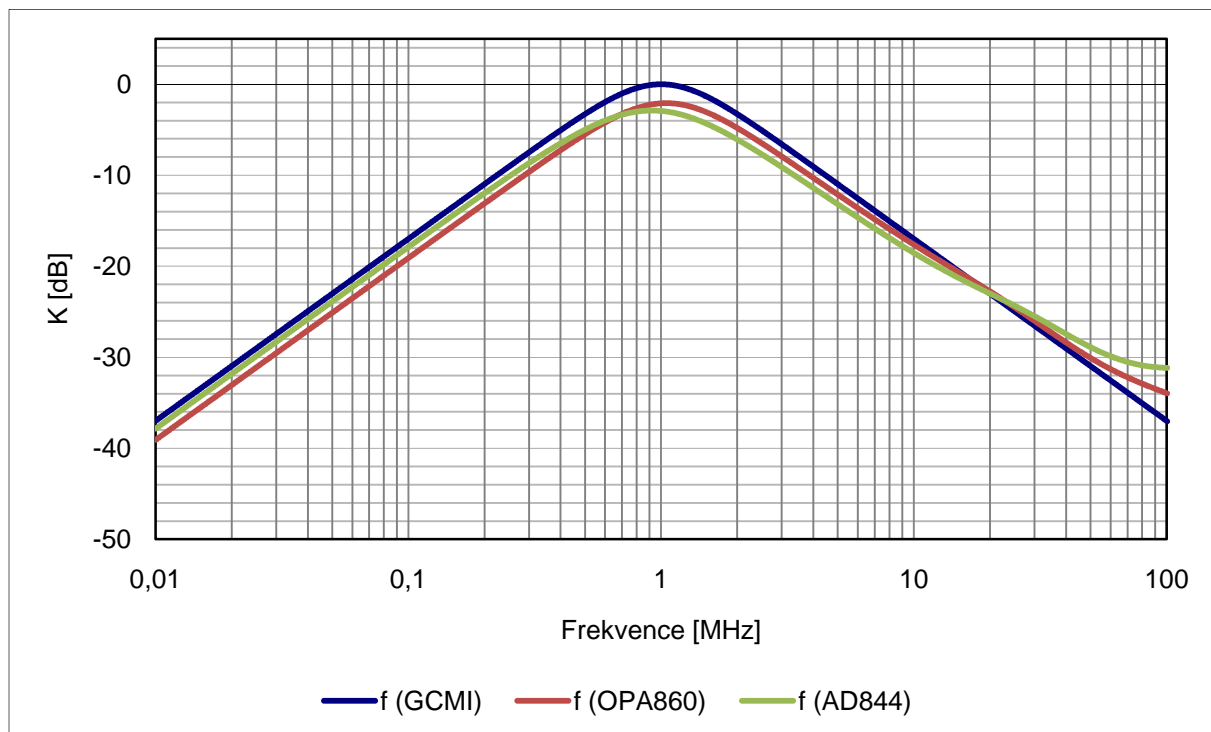
Dolní propust: IN1 – OUT3

Pásmová propust: IN3 – OUT3

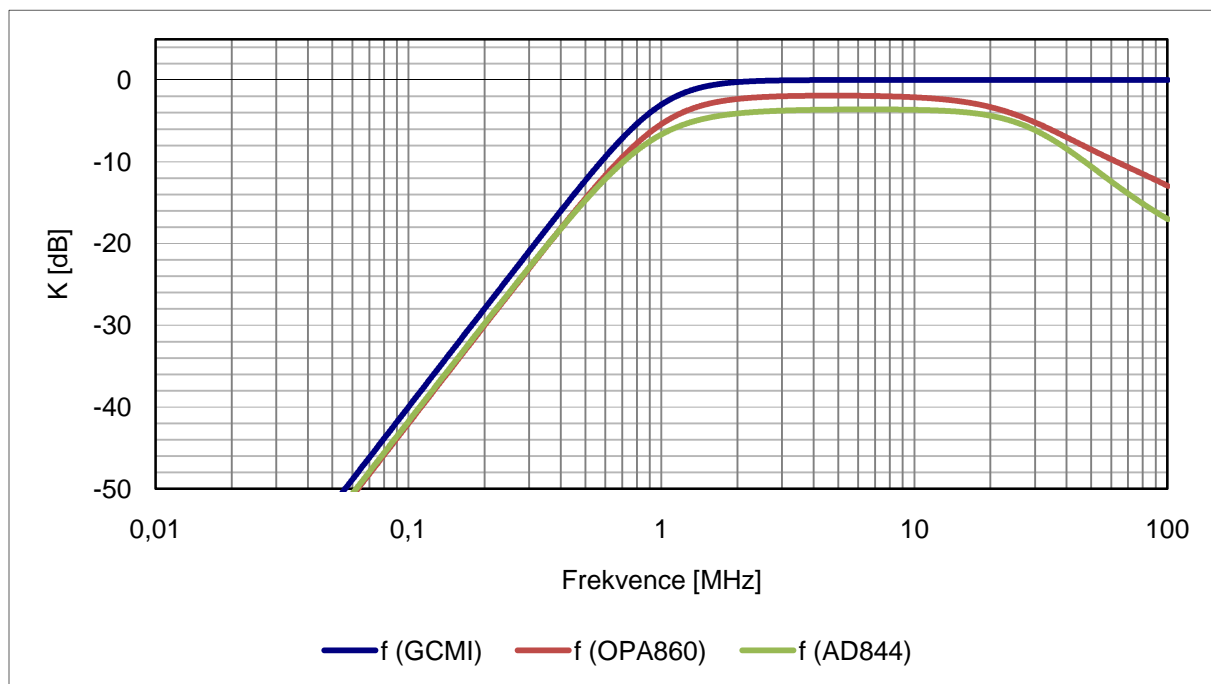
Horní propust: IN4 – OUT1



Obr.: 5.14 Dolní propust - srovnání charakteristik dle použitých obvodů



Obr.: 5.15 Pásmová propust - srovnání charakteristik dle použitých obvodů



**Obr.: 5.16      Horní propust - srovnání charakteristik dle použitých obvodů**

Z těchto grafů je patrné, že lepší vlastnosti pro funkci multifunkčního filtru má součástka OPA860 a proto jsem se ji rozhodl použít v reálné konstrukci.

## 6 Realizace multifunkčního filtru

### 6.1 Funkce zapojení

Zapojení funguje jako multifunkční kmitočtový filtr v proudovém módu. Vstupní signál se přivádí na konektor X1, výstupními piny jsou JP1 (OUT1) pro horní propust, pin JP3 (OUT3) pro dolní a pásmovou propust.

Jednotlivé módy filtru se přepínají jumperem na hřebínkové liště SV1. Pro dolní propust se jumper vloží do polohy IN1 a využije se výstup JP3 (OUT3). Pro pásmovou propust se jumper vloží do polohy IN3 a využije se výstup JP3 (OUT3). Pro horní propust se jumper vloží do polohy IN4 a využije se výstup JP1 (OUT1).

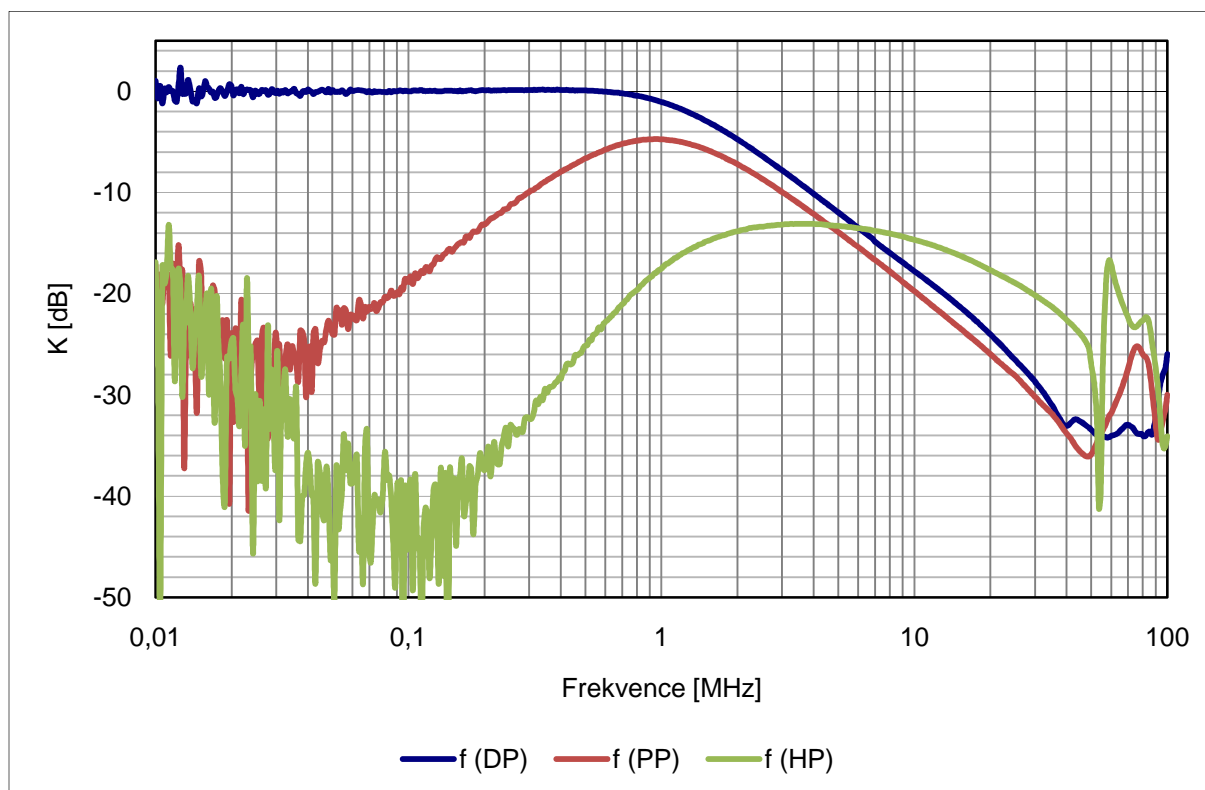
Multifunkční filtr je navržen pro charakteristický kmitočet  $f = 1\text{MHz}$  a jakost  $Q = 0,707$ .

### 6.2 Konstrukce

Pro konstrukci desky se použijí součástky v SMD provedení, kromě konektorů. Celý obvod je napájen symetrickým napětím  $\pm 5\text{V}$  přes konektor X2.

Schéma a desky plošných spojů jsou v příloze (Příloha 2).

## 6.3 Experimentální měření



Obr.: 6.1 Experimentální měření zrealizovaného multifunkčního filtru (akt.prvek OPA860)

Při experimentálním měření multifunkčního filtru se v přenosových funkcích objevil poměrně velký šum, hlavně v PP a HP na nízkých kmitočtech. V grafu vidíme, že  $f$  (DP) klesá asi 18dB/dek (má klesat 40 dB/dek). Může to být způsobeno větší výstupní parazitní kapacitou. Naměřená charakteristika pásmové propust  $f$  (PP) je se stejným poklesem zesílení, jak na nízkých tak vysokých kmitočtech, tedy asi 15dB/dek. Na mezním kmitočtu  $F_M = 1\text{MHz}$  není na 0 dB, ale je na hodnotě -5dB. To může být způsobeno větším parazitním vstupním odporem. Obvod v zapojení horní propusti vykazuje velký parazitní vstupní odpor a výstupní kapacitu. Je to patrné z grafu  $f$  (HP), kdy se zeslabení dostane maximálně na hodnotu -13dB za mezním kmitočtem. Zesílení do mezního kmitočtu je asi 20dB/dek.

Měření bylo provedeno na spektrálním analyzátoru Agilent 4395A (10Hz – 500MHz).

## 7 Závěr

Cílem bakalářské práce bylo zrealizovat proudový filtr s funkcí dolní propust, pásmová propust a horní propust. Nejprve byly shrnuty teoretické poznatky z oblasti filtrů v napěťovém a proudovém módu. Dále jsem v práci popsal bloky používané v proudovém módu. Prvotní návrh filtru je navržen autonomní metodou.

Pomocí simulace zapojení multifunkčního filtru v programu SNAP32 jsem získal jednotlivé propusti filtru, kde byl aktivní prvek GCMI. V programu ORCAD PSpice jsem modeloval zapojení obvodu s vícebranovými zdroji proudu řízenými proudem. Simuloval jsem obvod jak s ideálními vlastnostmi, tak i s parazitními prvky. Díky tomu, jsem mohl prozkoumat jednotlivé parazitní vlivy na frekvenční charakteristiky a vynesl jsem tyto charakteristiky do grafu.

Pomocí počítačové simulace jsem vybral OPA860 jako vhodnější obvod pro praktickou realizaci multifunkčního filtru v proudovém módu. Filtr jsem realizoval a změřil jeho vlastnosti. Výsledný graf reálných kmitočtových charakteristik se lišil, oproti simulovaným vlastnostem, díky rušivým parazitním vlivům obvodu.



## Literatura

- [1] HÁJEK, K., SEDLÁČEK, J., Kmitočtové filtry, BEN – technická literatura, Praha 2002, 535 s., ISBN 80-7300-023-7
- [2] DOSTÁL, T., Elektrické filtry P, skripta FEKT VUT v Brně, Brno 2007, 136.s, ISBN 80-214-561-X
- [3] DOSTÁL, T., Teorie elektronických obvodů, elektronická skripta FEKT VUT v Brně, Brno 2006, 177 s.
- [4] ŠOTNER, R, SLEZÁK, J., DOSTÁL, T. Electronically-controlled multifunctional current mode filter based on commercially available current conveyors and buffers, In proceedings of konference Radioelektronika 2009 Bratislava, Dostupné na www: <<http://ieeexplore.ieee.org>>
- [5] Jeřábek, J., Koton, J., Vrba, K. Zobecněná metoda návrhu multifunkčních kmitočtových filtrů. Elektrotechnika, 41/2007
- [6] Jeřábek, J., Vrba, K. Dolní propust třetího řádu v čistě proudovém módu. Elektrotechnika, 36/2007
- [7] Jeřábek, J., Lattenberg, I. Návrh kmitočtových filtrů s CMI vycházející z obecné admitanční sítě. Elektrotechnika, 50/2002
- [8] HOMOLA, R., Kmitočtové filtry s proudovými aktivními prvky, Diplomová práce, Brno, FEKT VUT v Brně, 2009
- [9] PAŠČINSKÝ, J., Aktivní kmitočtový filtr v proudovém módu, Bakalářská práce, Brno, FEKT VUT v Brně, 2009

## Seznam použitých symbolů a zkratek

ARC	aktivní filtr RC
C	kondenzátor
CCII	current conveyor
CM	proudový mód
DP	dolní propust
DSP	deska plošného spoje
f	kmitočet
$F_M$	mezní kmitočet
GCMII	Generalized Current Mirror and Inverter
HP	horní propust
I	proud
PP	pásmová propust
PZ	pásmová zadrž
Q	činitel jakosti
R	rezistor
U	napětí
UCC	univerzální proudový konvektor
VM	napěťový mód

# Seznam příloh

## Příloha 1

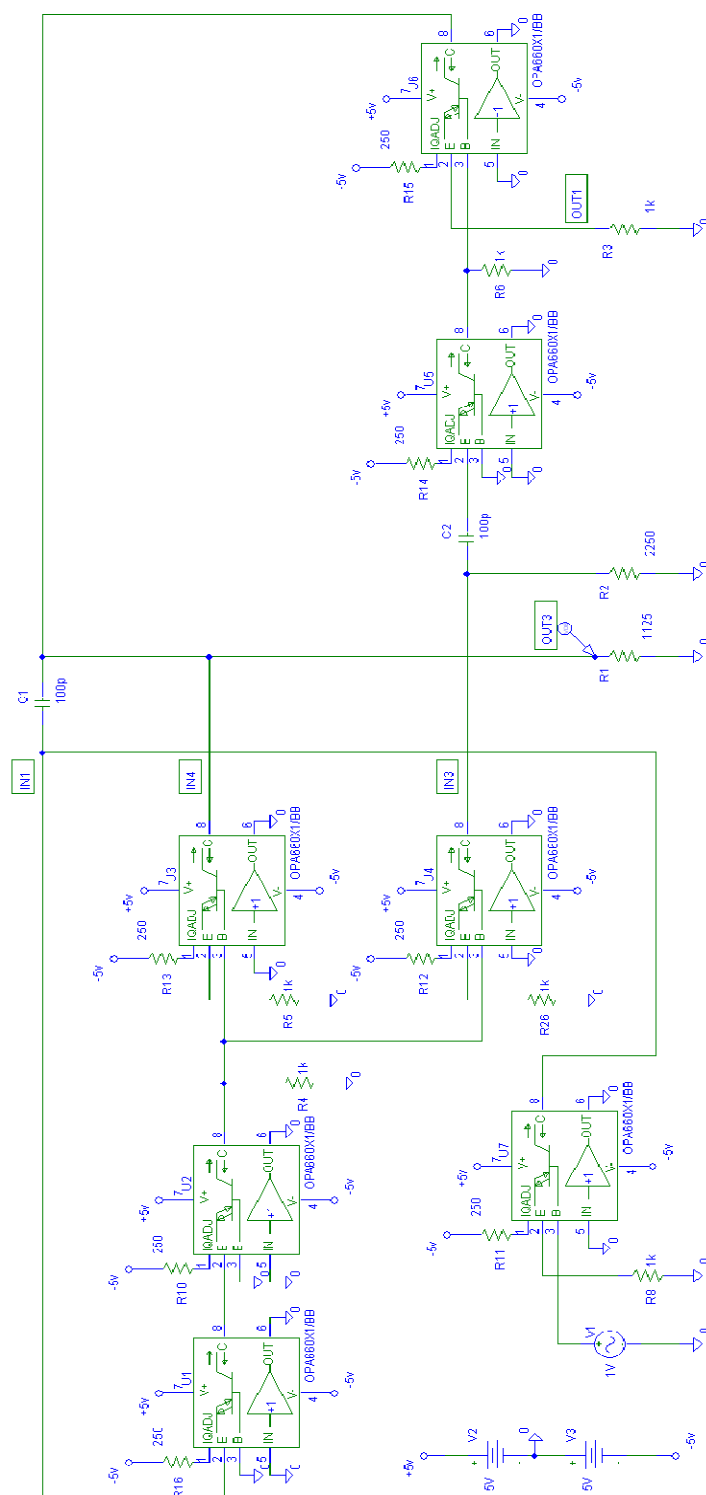
Model simulovaného zapojení (OPA860) .....	44
Model simulovaného zapojení (AD844).....	45

## Příloha 2

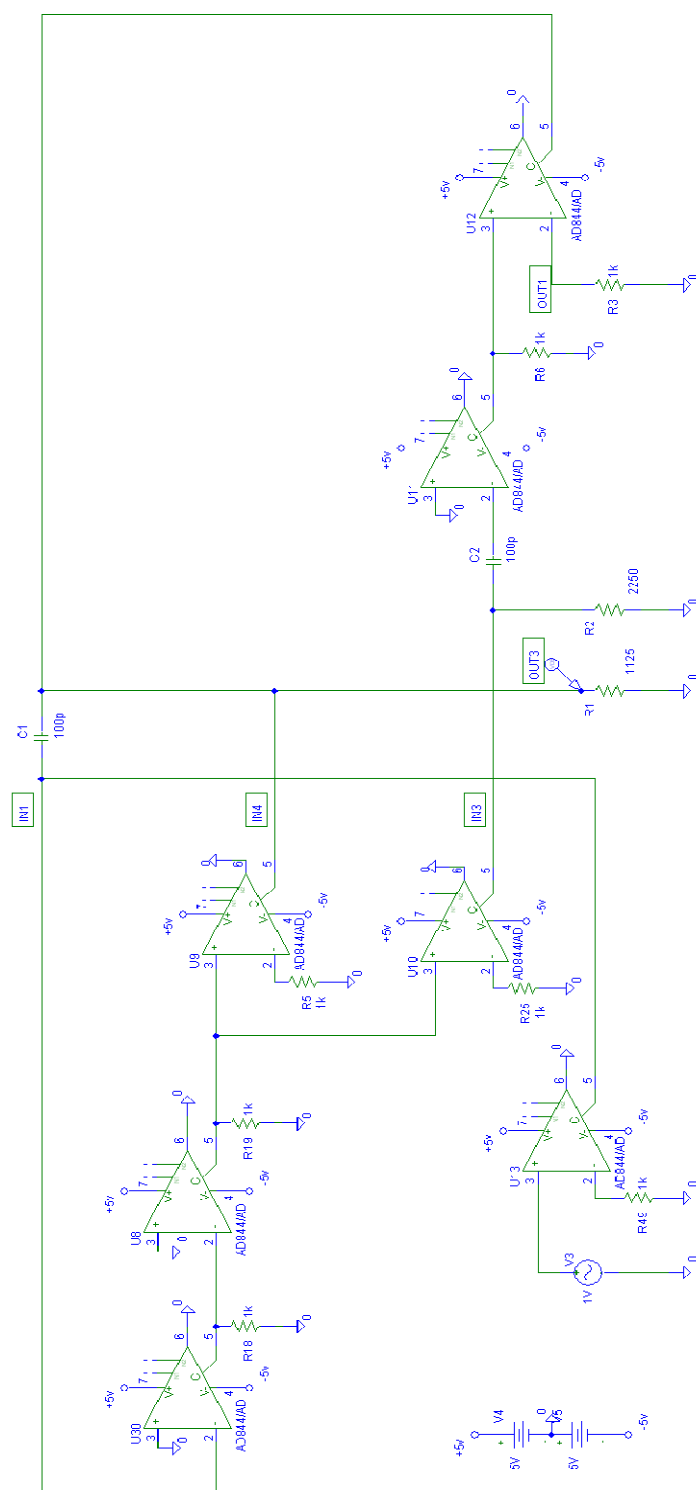
Schéma zapojení filtru.....	46
Deska plošného spoje (spodní strana).....	47
Deska plošného spoje (vrchní strana).....	47
Rozložení součástek (spodní strana).....	47
Rozložení součástek (vrchní strana).....	48
Seznam součástek.....	48

## Příloha 1

### Model simulovaného zapojení (OPA860)



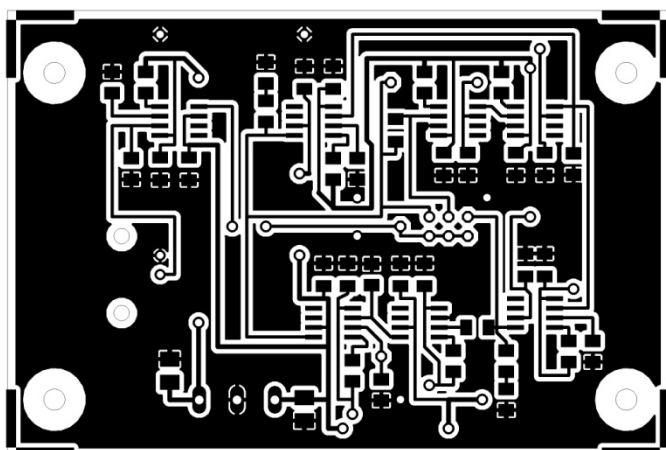
## Model simulovaného zapojení (AD844)



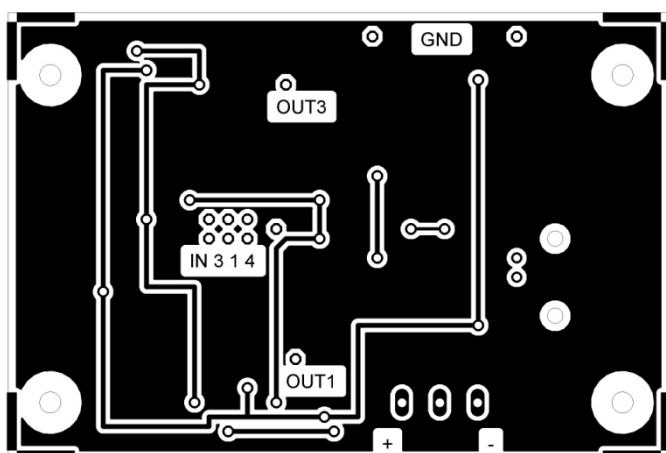
### Schéma zapojení filtru



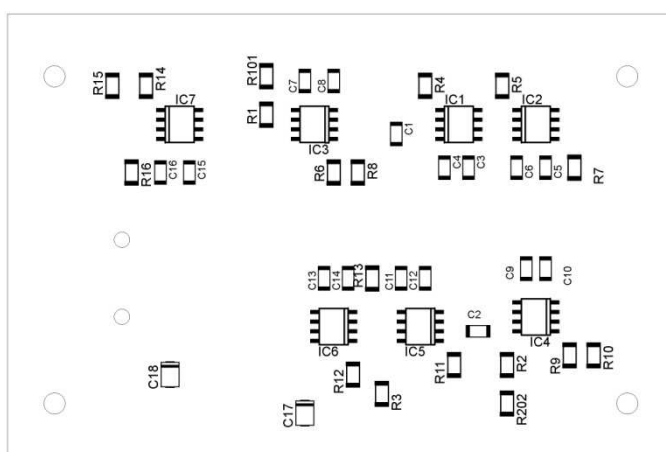
Deska plošného spoje (spodní strana)



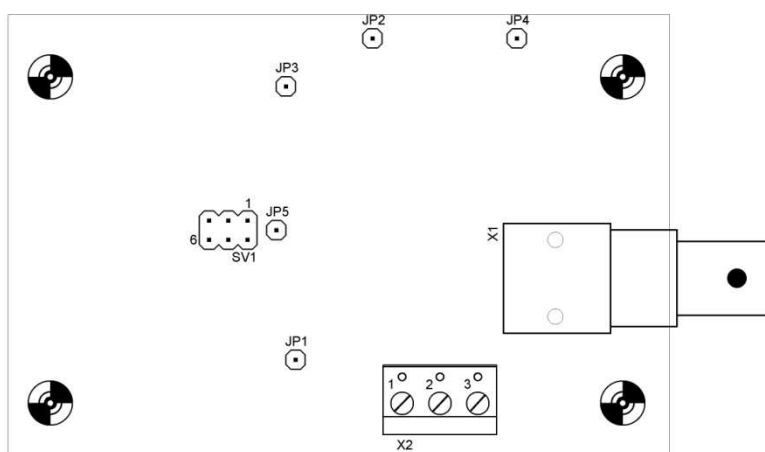
Deska plošného spoje (vrchní strana)



Rozložení součástek (spodní strana)



## Rozložení součástek (vrchní strana)



## Seznam součástek

R1	1k1 (1206)
R2	2k2 (1206)
R4, 5, 6, 9, 11, 12, 14	240R (1206)
R3, 7, 8, 10, 13, 15	1k (1206)
R16, R202	51R (1206)
R101	24R (1206)
C1, 2	100pF (keramický, 1206)
C3, 4, 5, 6, 7, 8	100nF (keramický, 1206)
C9, 10, 11, 12	100nF (keramický, 1206)
C13, 14, 15, 16	100nF (keramický, 1206)
C17, 18	22μF/10V (tantalový, 3528)
IC1, 2, 3, 4, 5, 6, 7	OPA860 (SO 08)
SV1	hřebíková lišta dvouřadá (rozteč 2,54mm)
JP1, 2, 3, 4, 5	piny
X1	BCN konektor
X2	šroubovací svorkovnice (WAGO500, rozteč 5mm)